



Joana de Miranda Alencar

**CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E
PETROFÍSICA DA FORMAÇÃO PENEDO (CRETÁCEO INFERIOR,
BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS) EM UM TESTEMUNHO DE
SONDAGEM.**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2016



UFRJ

Joana de Miranda Alencar

**CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E PETROFÍSICA DA
FORMAÇÃO PENEDO (CRETÁCEO INFERIOR, BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS)
EM UM TESTEMUNHO DE SONDAGEM.**

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Thiago Carelli Gonçalves

Rio de Janeiro

Julho 2016

JOANA, De Miranda Alencar

Caracterização Faciológica, Petrográfica e Petrofísica da Formação Penedo (Cretáceo Inferior, Bacia De Sergipe-Alagoas) em um Testemunho de Sondagem/ Joana de Miranda Alencar- - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2016.

xii, 78 f. : il.; apênd.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2016.

Orientador(es): Leonardo Fonseca Borghi de Almeida, Thiago Carelli Gonçalves

1. Geologia. 2. Geologia Sedimentar – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo, Fonseca Borghi de Almeida II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Título.

Joana de Miranda Alencar

**CARACTERIZAÇÃO FACIOLÓGICA, PETROGRÁFICA E PETROFÍSICA DA
FORMAÇÃO PENEDO (CRETÁCEO INFERIOR, BACIA DE SERGIPE-ALAGOAS)
EM UM TESTEMUNHO DE SONDAGEM.**

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientadores:

Leonardo Fonseca Borghi de Almeida
Thiago Gonçalves Carelli

Aprovada em: 17 de Agosto de 2016

Por:



Orientador: Dr. Leonardo Fonseca Borghi de Almeida (UFRJ)



Coorientador: M. Sc. Thiago Gonçalves Carelli (UFRJ)



M. Sc. Amanda Goulart Rodrigues (UFRJ)



M. Sc. Marcelo da Silva Mendes (UFRJ)

Agradecimentos

Agradeço aos meus orientadores Thiago G. Carelli e Leonardo Borghi pelos conselhos, discussões e ajuda na elaboração deste trabalho.

Agradeço ao Projeto SACL (Sergipe-Alagoas Carbonate Laboratory), registrado na Fundação COPPETEC como “Análise geológica e sedimentar de sucessões carbonáticas cretácicas em uma bacia sedimentar brasileira” (Proj. IGEO-15.981), apoiado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela BG E&P Brasil, com fundos da "Cláusula de Investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação, constante dos contratos para Exploração, Desenvolvimento e Produção de Petróleo e Gás Natural", pelo financiamento da bolsa, aquisição do material de estudo e custeio das análises realizadas.

Agradeço à empresa InterCement, detentora de exploração mineral na área da antiga pedreira Atol, pela permissão e apoio logístico na execução do poço de sondagem utilizado neste estudo.

Agradeço ao Laboratório de Geologia Sedimentar da Universidade Federal do Rio de Janeiro (Lagesed-UFRJ) por ceder a infraestrutura necessária para realização deste trabalho.

Agradeço à Geóloga Amanda Goulart Rodrigues pelo auxílio na descrição das lâminas petrográficas e pelas discussões quanto a interpretação dos resultados.

Agradeço ao Geólogo Marcelo da Silva Mendes pelas discussões, sugestões e auxílios de grande importância na concretização do trabalho.

Agradeço ao Professor Ricardo Tadeu Lopes e a Pesquisadora Alessandra Machado pela realização das análises de raios-X e auxílio na utilização do *software* para processamento das imagens.

Agradeço à colega Josiane Branco Plantz pela ajuda na preparação das imagens das amostras utilizadas neste trabalho.

À minha família e aos amigos que sempre estiveram ao meu lado durante toda a graduação.

Muito obrigada a todos!

Resumo

ALENCAR, Joana de Miranda. **Caracterização faciológica, petrográfica e petrofísica da Formação Penedo (Cretáceo Inferior, Bacia de Sergipe-Alagoas) em um testemunho de Sondagem**. 2016. xii, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

A bacia de Sergipe–Alagoas, situada na região Nordeste do Brasil, contempla uma das mais completas sucessões estratigráficas, que inclui depósitos das fases de Sinéclise, Pré-rifte, Rifte e Pós-rifte. Atualmente, constitui-se numa província petrolífera em avançado estágio exploratório, onde as rochas da Formação Penedo atuam como reservatórios no Campo de Pilar (AL), associado ao sistema petrolífero Barra de Itiúba-Coqueiro Seco. O presente trabalho teve por objetivo a caracterização faciológica, petrográfica e petrofísica do intervalo siliciclástico aqui atribuído à Formação Penedo, que ocorre na parte basal (196,6–214,4 m) do testemunho de sondagem de um poço (2-SMC-2-AL), perfurado na área da antiga pedreira de calcário Atol (atualmente explorada pela empresa InterCement), localizada no Município de São Miguel dos Campos, estado de Alagoas; tendo por finalidade a interpretação paleoambiental e avaliação do seu potencial como rochas reservatório. A sondagem atingiu 214,4 metros de profundidade, onde os primeiros 196,6 metros são constituídos por coquinas da Formação Morro dos Chaves. Dois intervalos litológicos, um inferior, arenítico (202,5–214,40 m), e outro superior, lutítico (196,6–202,50 m); sete fácies sedimentares (Ae, Am, Alc (areníticas), Het (heterolítica), Ca (carbonática), Sl e Lm (lutíticas) e duas sucessões de fácies (SFF e SFL) foram caracterizadas neste estudo. A sucessão SFF, inferior, é caracterizada por intercalações de arenitos maciços (fácies Am) e estratificados (fácies Ae), cuja granulometria varia de média a grossa, mal selecionada, com predomínio de grãos subarredondados; apresentam composição essencialmente arcoseana, com litoclastos de tamanho variado e intraclastos de argila; minerais acessórios (principalmente micas) ocorrem subordinadamente. A sucessão SFL, superior, é caracterizada por rochas com acamamento heterolítico (fácies Het) que exibem estruturas sedimentares trativas por corrente e ondas, além de deformacionais; uma camada carbonática, constituída por bioclastos (bivalves) e constituintes siliciclásticos (fácies Ca); Lamito maciço (fácies Lm) e Silito laminado (fácies Sl) com variado índice de bioturbação; além de arenitos com laminação cruzada por onda e bioturbados (fácies Alc). As fácies argilosas apresentam uma alta razão silte/argila, com areia muito fina quartzosa dispersa ou concentrada em lâminas de espessura milimétrica, com coloração cinza esverdeado e índice de bioturbação variado. As características faciológicas reconhecidas e o padrão de empilhamento das sucessões de fácies observado apontam para a evolução de um paleoambiente fluvial entrelaçado (SFF), na base, para lacustre (SFL), no topo. Depósitos eólicos descritos na literatura para Formação Penedo não foram identificados neste intervalo de estudo. O contato entre as duas sucessões de fácies ocorre de maneira abrupta, marcando, assim, uma possível superfície discordante associada à criação de espaço para acomodação real e máxima expansão do lago sobre o sistema fluvial. As análises petrofísicas realizadas em cinco amostras das fácies areníticas, revelam valores de porosidade efetiva entorno de 18% a 22%, e valores de permeabilidade

absoluta inferiores a 1mD, exceto pela fácies Am, que apresenta os maiores valores de permeabilidade (753,88mD), porém, pouco representativa na seção estudo (28%).

Palavras-chave: Formação Penedo, Fácies Sedimentares, Bacia de Sergipe-Alagoas.

Abstract

ALENCAR, Joana de Miranda. **Sedimentary facies, petrography and petrophysical characterization of Penedo Formation (Lower Cretaceous, Sergipe-Alagoas Basin) from a core data.** 2016. xii, 58 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The Sergipe-Alagoas basin, located in the northeast of Brazil, presents a completely stratigraphic successions, which includes deposits from Sineclise, Pre-rift, Rift and Post-rift stages. Nowadays, it is a petroleum province in advanced exploration, where deposits from Penedo Formation are reservoir rocks at Pilar field (AL), in the context of Barra de Itiúba-Coqueiro Seco petroleum system. This study aims to define sedimentary facies within petrographic characteristics, and petrophysical characterization of the lower siliclastic interval (196,20-214,40m) in a drill core (2-SMC-2-AL) located in São Miguel dos Campos city, state of Alagoas, in the Atol Quarry. Such sedimentary interval is related to Penedo Formation, which is located below the extensive coquina deposits (until 196,20m–Morro do Chaves Formation). Two lithological intervals are defined, a lower, (202,50-214,4m) sandy interval, and an upper (196,20-202,50m), muddy interval; seven lithofacies, three sandstone (Ae, Am and Alb), two mudstone (Sl and Lm), one heterolithic (Het) and also one carbonatic facies (Ca). These were divided into two facies successions (SFF and SFL) to be able to interpretate its depositional systems. The SFF, located on the bottom of siliciclastic interval, with thick beds of coarsed feldspatic arenites with stratification (Facies Ae) and massive (Facies Am), is interpreted as fluvial deposits. However on top, are described lacustrine deposits, compose the SFL with heterolithics beds showing tractive and deformed structures (Facies Het); thin carbonate bed composed by mixing of bioclasts and siliciclastics grains (Facies Ca); laminated siltstone (Facies Sl) and massive mudstone (Facies Lm) with varied bioturbation, and also very fine arenite with wave cross stratification (Facies Alc). The recognized sedimentary facies and the lithofacies successions show an environmental evolution from a braided fluvial (SFF) to lacustrine deposits (SFL) on top. Eolian deposits of Penedo Formation described in the literature are not recognized in studied interval. The contact between the both successions is abrupt, and is interpreted as creation of space on the basin and maximum real expansion of the lake over the fluvial system. The five petrophysical sample from sandstone lithofacies, shows effective porosity about 18% to 22%, and absolute permeability lower than 1mD, except to facies Am, which presents better values of absolute permeability (753,88mD), however, the lithofacies Am has scarce representativity in studied section (28%).

Keywords: Penedo Formation, Sedimentary facies, Sergipe-Alagoas basin.

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localização do Município de São Miguel dos Campos (Fonte: Google Earth, acessado em maio de 2016).....	3
Figura 2. Mapa de localização do poço 2-SMC-2-AL, na antiga pedreira Atol, Município de São Miguel dos Campos (Fonte: Google Earth, acessado em maio de 2016).	4
Figura 3. Mapa de localização da bacia de Sergipe-alagoas mostrando a subdivisão nas Sub-bacia Sergipe, ao sul, e Alagoas, ao norte (Modificado de Miranda, 2005 apud Cruz, 2008).....	10
Figura 4. Seção estratigráfica de detalhe da Sequência representantes da fase Ríftes da Bacia de Sergipe-Alagoas, região de São Miguel dos Campos (Borba et al., 2011).	17
Figura 5. Seção geológica do Campo de Pilar, Bacia Sergipe– Alagoas (Borba et al., 2009).	17
Figura 6. Diagrama Cronoestratigráfico da sub-bacia de Sergipe (Campos Neto et al., 2007).	18
Figura 7. Diagrama cronoestratigráfico da sub-bacia de Alagoas. A Formação Penedo está evidenciada pelo retângulo vermelho (Campos Neto et al., 2007).	19
Figura 8. Perfil Estratigráfico para o intervalo siliciclástico basal do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL.....	21
Figura 9. Aspectos macroscópicos das fácies areníticas no testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL. (A) Fácies Arenito com laminação cruzada de onda–Alc (196,80 m); (B) Fácies Arenito estratificado–Ae (207,80 m) e (C) Fácies Arenito Maciço–Am (213,40 m).	27
Figura 10. Variações da facies heterolítica (Het) no testemunho do poço 2-SMC-2-AL. A) falha; B) microrondulações assimétricas (Ripples) e laminações plano-paralela; e C) estruturas de carga (seta preta).	29
Figura 11. Fácies lutíticas e Carbonática. (A) Fácies siltito laminado (Sl), (B) Fácies lamito maciço Fácies Lm) e (C) Fácies carbonática (C – fácies Ca).	33
Figura 12. Fotografia (à esquerda) e Imagens de raio X (à direita) com arenito estratificado (Ae) e arenito maciço (Am). Profundidade das amostras: (A) 206,40m a 206,80m e (B) 212,25m a 212,45m.....	35
Figura 13. Fotografia (à esquerda) e Imagens de raio X (à direita) das amostras: (C) Siltito laminado (197,15 a 197,30m) e (D) Lamito maciço (199,10 a 199,35m).	36
Figura 14. Principais texturas, estruturas e arcabouço das amostras analisadas. ..	41
Fotomicrografia (A): Arenito muito fino, grãos subangulares, e uma orientação dos cristais de biotita. NP (Nicol Paralelo). Zoom 10X. Profundidade de 196,65m.	41
Fotomicrografia (B): Lamito arenoso com laminação marcada por lâminas de areia fina. NP. Zoom 20X. prof. 200,40m.	41
Fotomicrografia (C): Visão geral da lâmina de arenito bioclástico. NC (Nicol Cruzado). Zoom 1,25X. prof. 201,25m.	41

Fotomicrografia (D): Detalhe do arcabouço do arenito bioclástico, e sua pseudomatriz argilosa (seta branca). NP. Zoom 10X. prof. 201,25m.	41
Fotomicrografia (E): Sobrecrecimento em cristais de microclínio (seta preta) e pirita com crescimento em cristais de biotita (seta branca). NP. Zoom 10X. prof. 205,30m.	43
Fotomicrografia (F): Sobrecrecimento em cristais de feldspatos (seta preta) e substituição de pirita (Py) em cristais de biotita (Bt) NC. Zoom 10X. prof. 205,30m.	43
Fotomicrografia (G): Arenito grosso, subarredondado, com detalhe para o cimento de argilomineral autigênico indiferenciado (seta azul). NC. Zoom 10X. prof. 208,90m.	43
Fotomicrografia (H): Sobrecrecimento em cristais de feldspato potássico (Fk). NC. Zoom 10X. prof. 206,15m.	43
Fotomicrografia (I): Alteração em cristais de microclínio (Mcl), e formação de argilomineral autigênico indiferenciado NP. Zoom 10X. prof. 205,30m.	43
Fotomicrografia (J): Alteração em cristais de microclínio, e formação de argilomineral autigênico indiferenciado NC. Zoom 10X. prof. 205,30m.	43
Figura 15. Diagrama de Folk (1968) com os grupos petrográficos I,III e IV.	43
Figura 16. Modelo arquitetural para o sistema fluvial entrelaçado distal (shallow, perennial, san-bed braided rivers) (SB – Sand bars e DA – Downstream accrescion) (Adaptado de Miall, 1995).	44
Figura 17. Bloco diagrama mostrando um modelo esquemático da paleogeografia da sequência sin-rifte (Barremiano/Neocomiano) (Modificado de Hasui et al., 2012).	46
Figura 18. Perfil de Permeabilidade para as amostras do intervalo siliclástico.	48
(Tipos Petrofísicos A e B: TP A e TPB).....	Error! Bookmark not defined.
Figura 19. Perfil de Porosidade para as amostras do intervalo siliclástico.	48
Figura 20. Perfil de Correlação permeabilidade absoluta e porosidade efetiva (KabsxPhi), com os tipos petrográficos A e B (TP A e TP B).....	48
Figura 21. Bloco diagrama mostrando um modelo esquemático da paleogeografia da sequência sin-rifte (Barremiano/Neocomiano) com possível locação do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL (Adaptado de Hasui et al., 2012).	51
Figura 22. Imagem dos perfis geofísicos para as amostras do intervalo siliclástico do testemunho 2-SMC-2-AL exportado do software Petrel, contendo dados dos ensaios de petrofísica: (Permeabilidade absoluta - marcadores azuis; e porosidade – marcadores vermelhos). RG – Perfil de raio gama; SP – Perfil de Potencial Espontâneo; Por. T – Porosidade Total; e Por. Efe – Porosidade Efetiva extraídos do Perfil Sônio.	54

Lista de quadro

Quadro 1. <i>Síntese das fácies do intervalo basal do testemunho de sondagem, com suas respectivas diagnose e interpretação.</i>	22
---	----

Sumário

Agradecimentos	v
Resumo.....	vi
Abstract.....	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODO	3
2.1 Descrição do testemunho.....	5
2.2 Análise de fácies	5
2.2.1 Imagens de raios-X	6
2.2.2 Análises petrográficas	6
2.3 Análise Petrofísica.....	7
3. CONTEXTO GEOLÓGICO	9
3.1 Bacia de Sergipe-Alagoas.....	9
3.1.1 Aspectos gerais da bacia.....	9
3.1.2 Arcabouço estrutural.....	10
3.1.3 Evolução tectonosedimentar e Estratigrafia	11
3.2 Formação Penedo.....	15
4. RESULTADOS.....	20
4.1 Caracterização litológica	20
4.2 Fácies sedimentares	22
4.2.1 Fácies areníticas.....	24
4.2.2 Fácies heterolítica.....	28
4.2.3 Fácies lutíticas	29
4.2.4 Fácies carbonática (Ca).....	31
4.3 Imagens de raios-X	34
4.4 Análise petrográfica	37
4.5 Sucessão de fácies	43
SUCESSÃO DE FÁCIES FLUVIAL (SFF)	44
SUCESSÃO DE FÁCIES LACUSTRE (SFL).....	45
4.6 Análise petrofísica	46
5. DISCUSSÕES	49
5.1 Paleoambiente	49
5.2 Porosidade e permeabilidade	52
6. CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56

Apêndice A – Fotografia dos testemunhos de sondagem do intervalo siliciclástico do poço 2-SMC-2-AL (196,20m a 214,40m).

Apêndice B – Planilha com dados da Análise Petrofísica das amostras do intervalo siliciclástico do poço 2-SMC-2-AL

1. INTRODUÇÃO

A Bacia de Sergipe-Alagoas, situada na região nordeste do Brasil, cobre uma área de aproximadamente 35.000 km² e contempla uma das mais completas sucessões estratigráficas, incluindo depósitos das fases de Sinéclise, Pré-rifte, Rifte e Pós-rifte (Campos Neto *et al.*, 2007).

Desde a década de 1940, a bacia tem sido objeto de inúmeros estudos geológicos de cunho sedimentológico e estratigráficos, sobretudo na seção Pré-rifte voltado à exploração de hidrocarbonetos. Atualmente, seus domínios de terra e de águas rasas constituem províncias petrolíferas em avançado estágio exploratório (Bizzi *et al.*, 2003).

Os estudos mais recentes na seção Rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas buscam análogos aos reservatórios da seção Pré-Sal das bacias de Campos e Santos, e impulsionaram fortemente a caracterização das coquinas lacustres da Formação Morro do Chaves (Câmara, 2013; Tavares, 2015). Enquanto trabalhos nas sucessões siliclásticas do estágio rifte da bacia, buscam como principal objetivo a caracterização da Formação Barra de Itiúba devido seu potencial para rochas geradoras (Borba *et al.*, 2011).

Neste contexto, lateralmente intergitada a Formação Barra de Itiúba e sendo sobreposta pela Formação Morro do Chaves, encontra-se a Formação Penedo (Eocretáceo), caracterizada predominantemente por arenitos médios a conglomeráticos, frequentemente estratificados e, por vezes, exibindo reelaboração eólica (Schaller, 1969; Ferreira, 1990 *apud* Feijó, 1994; Bizzi *et al.*, 2003), que atuam como rochas reservatórios nos Campo de Pilar e Furado (Bizzi *et al.*, 2003; Borba *et al.*, 2011). Para a Formação Penedo, ainda é reconhecido uma escassez de

trabalhos de caracterização sedimentológica e estratigráfica, e o estudo mais referenciado faz parte de um relatório interno da PETROBRAS, não estando disponível à comunidade científica.

A carência bibliográfica e a falta de informação de subsuperfície (testemunho) da Formação Penedo na região de São Miguel dos Campos foi expressa no trabalho de Borba *et al.* (2011). No qual, os arenitos da Formação Penedo foram reconhecidos apenas em perfil geofísico, e correlacionados aos mesmos depósitos encontrados no Campo de Pilar, não levando em consideração suas particularidades na região. Portanto, estudos mais detalhados das características sedimentares e de reservatório dos depósitos da Formação Penedo na região de São Miguel dos Campos são de extrema importância para uma caracterização da unidade, e se possível, uma correlação às descrições realizadas por Bizzi *et al.* (2003) no Campo de Pilar.

Este presente trabalho objetiva a caracterização da Formação Penedo em seus aspectos sedimentológicos, petrográficos e petrofísicos, a partir de um testemunho de sondagem no poço 2-SMC-2-AL. Tendo como objetivos principais: (i) a caracterização sedimentológica do intervalo basal do testemunho 2-SMC-2-AL, com uma análise de fácies suportada por imagens de raios-X e descrições petrográficas das principais fácies; (ii) uma divisão em sucessões de fácies, para um entendimento paleoambiental da Formação Penedo no local de estudo; e (iii) uma caracterização petrofísica do intervalo, com dados de permeabilidade absoluta e porosidade efetiva dos intervalos areníticos a fim de analisar a qualidade como reservatórios de hidrocarboneto.

2. MATERIAL E MÉTODO

O material de estudo é composto pelo intervalo siliciclástico aqui atribuído à Formação Penedo que ocorre na parte basal (196,20m–214,40m) do testemunho de sondagem do poço 2-SMC-2-AL (coordenadas geográficas 09°45'29.05"S e 36°09'10.65" W), perfurado na área da antiga pedreira de calcário Atol, explorada atualmente pela empresa InterCement, localizada no Município de São Miguel dos Campos, no estado de Alagoas (figura 1 e 2).

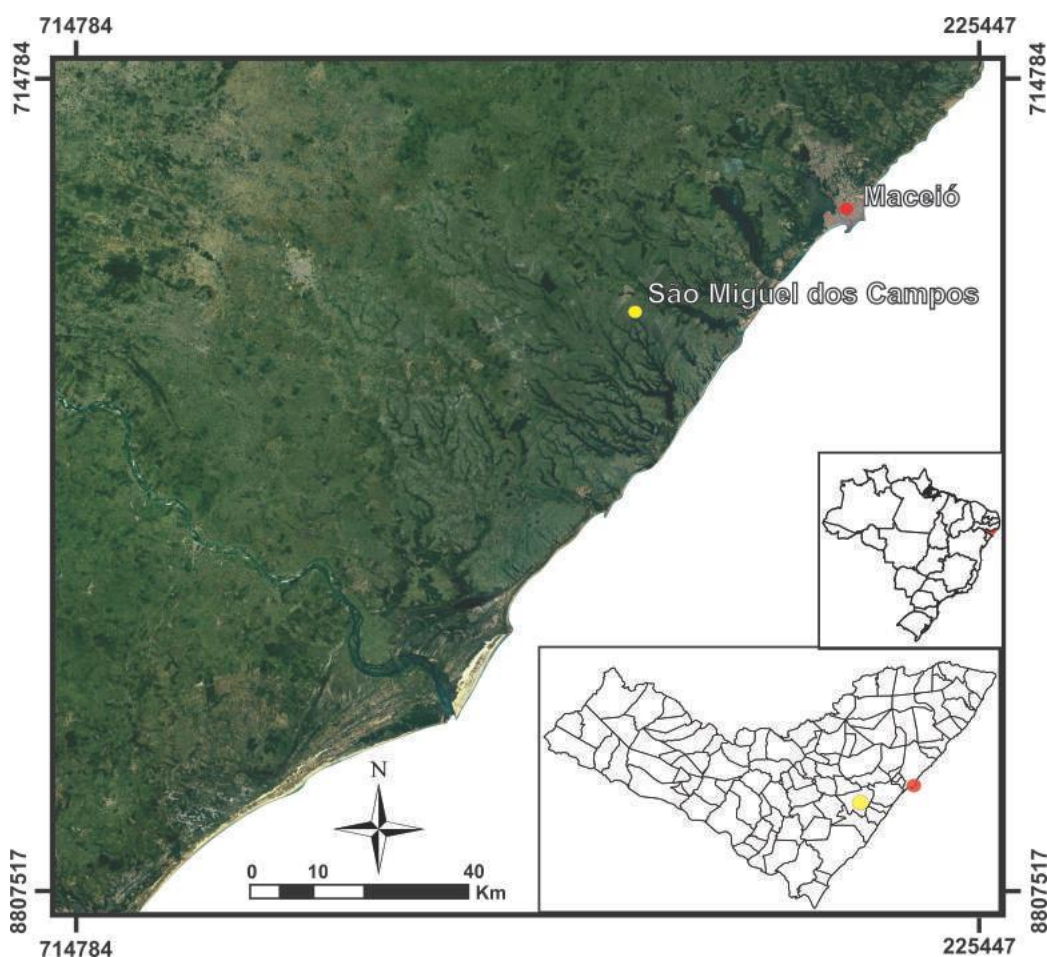


Figura 1. Mapa de localização do Município de São Miguel dos Campos (Fonte: Google Earth, acessado em maio de 2016).

A sondagem alcançou a profundidade final de 214,40 metros, contudo, sem atingir o embasamento cristalino. Apresenta uma recuperação aproximada de 92%, onde os primeiros 196,20 metros, são constituídos por rochas carbonáticas da Formação Morro do Chaves.

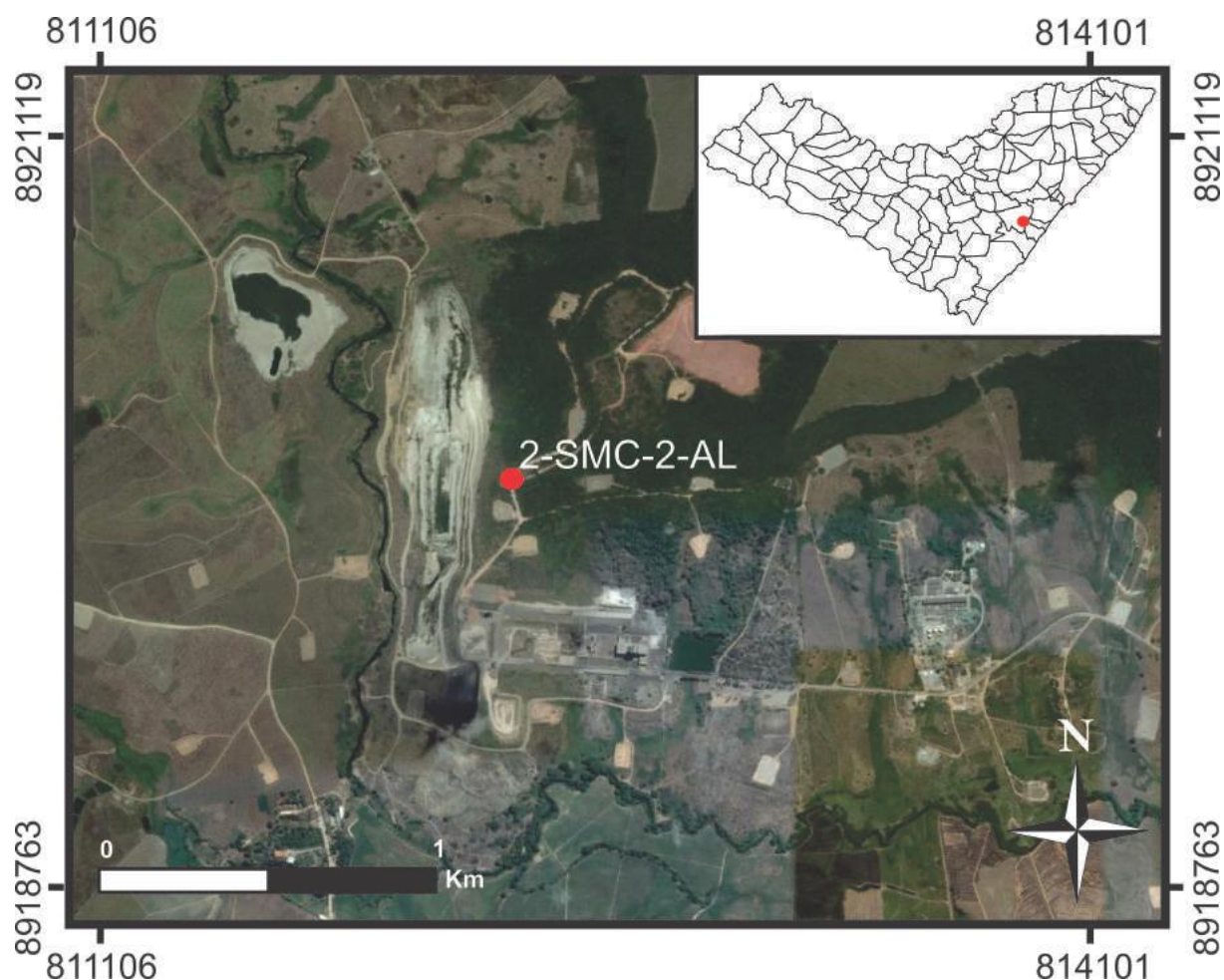


Figura 2. Mapa de localização do poço 2-SMC-2-AL, na antiga pedreira Atol, Município de São Miguel dos Campos (Fonte: Google Earth, acessado em maio de 2016).

2.1 Descrição do testemunho

O intervalo de estudo (196,20m–214,40m) do testemunho foi descrito na escala de 1:40, observando-se aspectos texturais (granulometria, seleção e arredondamento dos grãos), litologia, mineralogia, cores, tipo de contato estratais e estruturas sedimentares (biogênicas e hidrodinâmicas), com auxílio de um estereomicroscópio (Zeiss modelo Stemi 2000-C). Para determinação das cores, foi utilizada a carta de cores de Munsell (Rock-Color Chart Committee, 1991).

Os dados obtidos foram posteriormente digitalizados para a elaboração de um perfil estratigráfico sintético utilizando o *software CorelDraw®* na escala 1:80 (Figura 8).

2.2 Análise de fácies

A caracterização das fácies sedimentares seguiu conceitos de Selley (1985) e Borghi (2000), observando atributos como: litologia, composição, cor e estruturas sedimentares. Uma vez definidas, as fácies foram agrupadas em sucessões de fácies, segundo o conceito de Borghi (2000) para caracterização do paleoambiente deposicional.

Em apoio à identificação de estruturas sedimentares e a caracterização de aspectos texturais e composicionais, foram realizadas imagens de raios-X e análises petrográficas.

2.2.1 Imagens de raios-X

Após a descrição do intervalo de estudo no testemunho de sondagem (196,20m–214,40m), foram selecionadas 13 amostras, algumas das quais, apresentando “aspecto maciço” ou “estruturas sedimentares difusas” para realização das imagens de raios-X no Laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN-COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

As análises foram realizadas através do equipamento raios-X Yxlon, modelo Y.TU160-D05, com tensão máxima de 160kV e foco de 1mm. As imagens adquiridas, foram processadas no *software Ic.vision 10.2®*, utilizando ferramentas de contraste, brilho e inversão de cores (negativo), de forma a auxiliar a identificação de estruturas sedimentares.

2.2.2 Análises petrográficas

Como auxílio à caracterização textural e composicional, foram confeccionadas nove lâminas delgadas a partir de amostras impregnadas com resina epoxy azul. Destas amostras, seis, oriundas das fácies areníticas (196,65m; 201,65m; 205,30m; 206,15m; 208,90m; 211,85m); duas amostras, oriundas das fácies lutíticas (197,95m; 200,40m) e; uma amostra, oriunda da parte basal da fácies carbonática (201,25m), que apresenta elevada proporção de matriz siliciclástica.

As lâminas delgadas foram analisadas por meio de um microscópio de luz transmitida/polarizada, modelo ZEISS Imager A2m, de forma qualitativa e quantitativa. A análise qualitativa teve por objetivo caracterizar a granulometria, o grau de arredondamento dos grãos, o grau de seleção das amostras, tipos de contatos entre os grãos e estruturas sedimentares. Já a análise quantitativa, teve por

objetivo a contagem de 300 pontos em cada lâmina delgada, através do método Gazzi-Dickinson (que visa a medição estatística dos componentes de uma rocha sedimentar, aplicado principalmente para arenitos) (Zuffa, 1985), incluindo a descrição da composição, aspectos diagenéticos e tipos de poros. Para a lâmina oriunda da parte basal da fácies carbonática, foi realizada apenas a análise qualitativa, que teve por objetivo caracterizar os constituintes siliciclásticos e carbonáticos.

Os resultados obtidos a partir das descrições quantitativas foram importados para o *software Petroledge*® (De Ros *et al.*, 2007) e classificadas a partir do percentual de constituintes primários segundo Folk (1968).

2.3 Análise Petrofísica

Com base na caracterização faciológica e petrográfica, foram selecionadas cinco amostras (196,45m; 201,40m; 204,90m; 205,90m e 206,95m) representativas das fácies areníticas definidas neste trabalho (Ae, Am, Alc) para realização de análises petrofísicas. Estas análises, tiveram por objetivo determinar suas características petrofísicas (porosidade efetiva e permeabilidade absoluta) e avaliar o potencial do intervalo de estudo como possível reservatório de hidrocarbonetos.

Para realização das análises petrofísicas, as amostras passaram por um processo de preparação que visa a i) extração de hidrocarbonetos e/ou contaminantes (fluido de perfuração), utilizando extratores Soxhlet e tolueno como solvente; ii) secagem em estufa seca a 60°C; iii) extração de sais utilizando extratores Soxhlet e metanol como solvente e; iv) secagem em estufa seca a 60°C.

As análises de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta foram realizadas pela empresa Solintec Consultoria e Serviços de Geologia, segundo normas API (*American Petroleum Institute*), utilizando os equipamentos CoreLab UltraPore-300 e CoreLabUltraPerm-600, baseados nas leis de Boyle⁽¹⁾ e Darcy⁽²⁾, respectivamente.

(1) Equação da Lei Boyle:

$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$, sendo P_1 : Pressão Inicial; V_1 : Volume Inicial; P_2 : Pressão Final e V_2 : Volume Final.

(2) Equação da Lei de Darcy:

$Q = k \left(\frac{h_1 - h_2}{L} \right) A$, sendo Q : Vazão; k : coeficiente de permeabilidade; h_1 : Carga total no início do fluxo; h_2 : Carga total no final do fluxo; A : Área e L : Comprimento.

3. CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Bacia de Sergipe-Alagoas

3.1.1 Aspectos gerais da bacia

A bacia de Sergipe-Alagoas localiza-se no litoral nordeste do Brasil, situada ao longo dos estados de Sergipe e Alagoas, entre os paralelos 9° e 11°33'S, de forma alongada em direção NE-SW, e uma área emersa de 12.000 km². A porção submersa não é bem definida, com uma área estimada em 22.600 km², admitindo que o limite da bacia se estenda além da cota batimétrica de 2000 m (LANA, 1990).

A delimitação desta bacia é um assunto de divergência até em trabalhos mais recentes, sendo primeiramente definida por Lana (1985) e (1990) como uma única bacia. Enquanto, em uma revisão por Feijó (1994), esta foi individualizada em Bacia de Sergipe e Bacia de Alagoas, pelas diferenças encontradas no carácter estrutural e estratigráfico. No qual, o limite entre essas duas, seria dado pelo Alto de Jaboaã-Penedo.

Já em trabalho mais recente, Campos Neto *et al.* (2007) expõem uma nova revisão estratigráfica e retoma ao conceito de uma única bacia, sendo apenas dividida em sub-bacias (figura 3) como sugerido por Lana (1985). Sendo limitada a nordeste pela Bacia de Pernambuco-Paraíba no alto de Marogogi, e a sudeste pela Bacia de Jacuípe, onde o limite é indiviso.

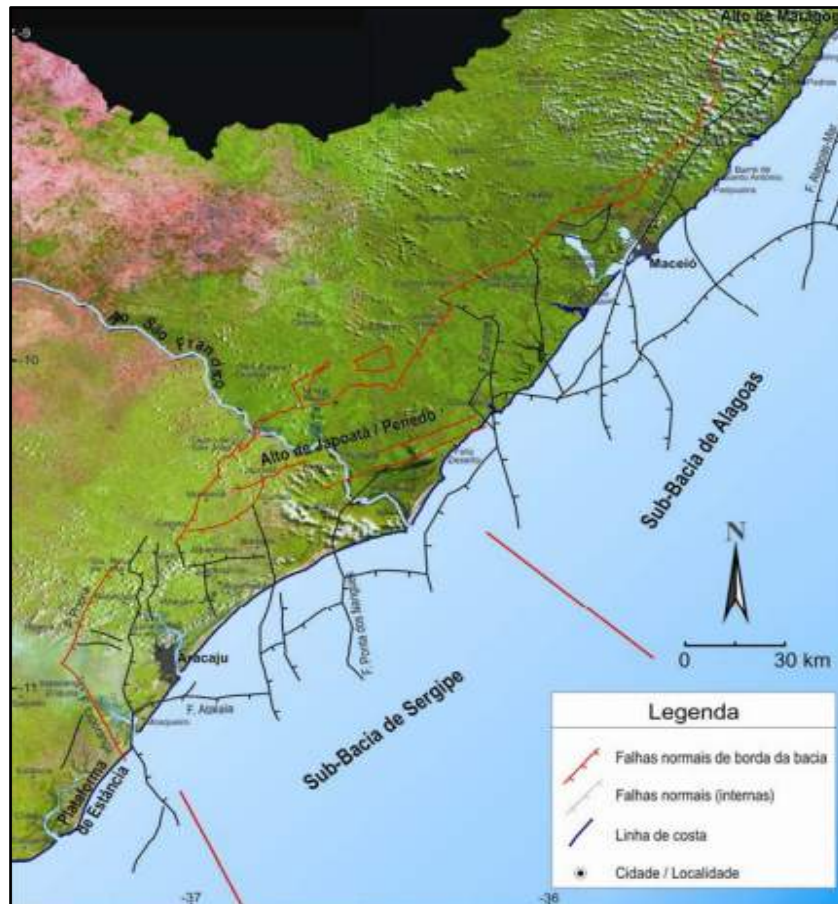


Figura 3. Mapa de localização da bacia de Sergipe-alagoas mostrando a subdivisão nas Sub-bacia Sergipe, ao sul, e Alagoas, ao norte (Modificado de Miranda, 2005 *apud* Cruz, 2008).

3.1.2 Arcabouço estrutural

De acordo com dados de anomalias gravimétricas do trabalho de Lana *et al.* (1990), a bacia de Sergipe-Alagoas apresenta-se subdividida em blocos ou compartimentos tectônicos, em geral limitados por grandes falhas subparalelas à estruturação regional da bacia (N45°E). As falhas apresentam direções e rejeitos variados, sendo os mais expressivos por vezes superiores a 5 km, e estão relacionados à direção N45°E (alinhamento da Charneira Alagoas e borda NW da bacia); N-S, as mais antigas e estão dispostas de forma escalonada (*en échelon*); e ainda com direções E-NE como falhas limites dos compartimentos tectônicos (figura 3). Já as falhas do final do riftemento apresentam grandes rejeitos normais e

orientação preferencial N30°-45°E, sendo típicas do rifte gerado por distensão, caracterizando um nítido alinhamento NE-SW à bacia.

3.1.3 Evolução tectonosedimentar e Estratigrafia

No trabalho de Ponte & Asmus (1976) foram correlacionadas as sequências sedimentares a estágios evolutivos (Sinéclise, Pré-rifte, Rifte e Drifte) que levaram à formação das bacias da margem leste brasileira. Usando este mesmo conceito, Campos Neto *et al.* (2007) propuseram uma definição do preenchimento sedimentar da Bacia de Sergipe-Alagoas por supersequências (delimitadas a partir de discordâncias regionais): Paleozoica, Pré-rifte, Rifte, Pós-rifte e Drifte, as quais são descritas abaixo (figuras 6 e 7).

Supersequência Paleozoica: Em condições intracratônicas e sobre o embasamento pré-cambriano foi depositada a Sequência Carbonífera representada pela formação Batinga (ambiente glacial subaquoso). E posteriormente a Sequência Permiana, constituída pela formação Aracare composta por registros de ambiente desértico, litorâneo e deltaico. Sendo esta Supersequência o registro sedimentar dos eventos de sinéclises paleozoicas que cobriam extensas áreas do continente Gondwana. Podendo ser correlacionável a Sequência Permo-Carbonífera de Feijó (1994).

Sequência Pré-rifte: Podendo ser correlacionada à Sequência Juro-Eocretácea de Feijó (1994). Formada durante os estágios iniciais de ruptura do paleocontinente Gondwana, gerando um soerguimento crustal e conjunto de depressões afrobrasileiras. Nestas depressões depositam-se sistemas lacustres pouco profundos, caracterizados pelos folhelhos vermelhos da Formação Bananeira,

e eventualmente invadidos por sistemas fluviais entrelaçados com retrabalhamento eólico, representados pelos arenitos da Formação Serraria.

Sequência Rifte: Corresponde ao estágio de subsidência mecânica da bacia, sendo influenciada pelo intenso falhamento inerente ao processo de ruptura, gerando estratos que exibem grandes variações laterais de fácies e espessura. Para o início e o fim do rifte da bacia ainda há controvérsias; Feijó (1994) e Souza-Lima *et al.* (2002) posicionam o início do estágio rifte no final da idade Rio da Serra. Entretanto, na mais nova revisão estratigráfica de Campos Neto *et al.* (2007) admitem o início com idade Rio da Serra (aproximadamente 142 Ma), com a instalação de um paleolago correspondente à Formação Feliz Deserto. E o término do rifte, seria associado ao início da idade Alagoas (aproximadamente 116 Ma), quando é admitido um tectonismo bastante intenso na bacia.

Na idade Rio da Serra, um período de estiramento inicial do rifte, instalou-se um sistema lacustre-deltaico da Formação Feliz Deserto. Na borda sergipana da bacia depositam-se fanglomerados da Formação Rio Pitanga, os registros alúvio-fluvial da Formação Penedo e em áreas mais distais ocorrem os arenitos, siltitos e folhelhos deltaico-lacustres da Formação Barra de Itiúba. Já na porção alagoana, os conglomerados da Formação Pitanga estão ausentes, pois neste período a ruptura esta restrita a porção sergipana. Enquanto, as Formações Penedo e Barra de Itiúba estão bem desenvolvidas.

Durante as idades Jiquiá a Alagoas, ocorre um segundo pulso tectônico, implantando-se sistemas alúvio-deltaico e lacustre da Formação Coqueiro Seco. Na região proximal da porção sergipana predominava a deposição dos conglomerados aluviais da Formação Rio Pitanga e das coquinas da Formação Morro do Chaves, enquanto nas porções distais depositavam-se os arenitos e folhelhos deltaico-

lacustres da Formação Coqueiro Seco. Em Alagoas, os depósitos alúvio-deltaicos e lacustres Coqueiro Seco prevaleciam em relação aos conglomerados aluviais da Formação Poção e aos carbonatos e folhelhos Morro do Chaves.

Durante o Eoalagoas o tectonismo foi bastante intenso e delineou-se a linha da charneira, acompanhada do soerguimento da porção sergipana e de parte da porção alagoana, marcando a grande discordância denominada “Pré Neo-Alagoas”. A nordeste da porção alagoana e no bloco baixo da linha de charneira ocorria subsidência, e conseqüentemente a sedimentação ficou restrita a estas porções. Na sub-bacia alagoana ocorreu a deposição dos evaporitos “Paripueira”, interpretados como tendo sido precipitados a partir de uma salmoura marinha com influência continental, marcando a primeira incursão marinha na bacia. Foram depositados também os arenitos, folhelhos, evaporitos e calcilutitos da Formação Maceió, em leques alúvio-deltaicos e ambiente do tipo sabkha.

Sequência Pós-rifte: Neste estágio inicia-se o processo de subsidência térmica, no qual a bacia sofre basculamento para SE, e ainda ocorrendo uma primeira grande incursão marinha, marcando a transição do ambiente continental para marinho. Na sub-bacia de Sergipe a sedimentação na porção emersa é retomada, enquanto em Alagoas a deposição ficou restrita ao bloco baixo da charneira. Sedimentos da Formação Muribeca são depósitos principais representantes desta época, compostos por siliciclásticos alúvio-fluviais e deltaicos do Membro Carmópolis (representantes do trato de sistemas de mar baixo e transgressivo), os evaporitos, carbonatos microbiais e folhelhos do Membro Ibura (representantes do trato de sistemas de mar alto), e restrito apenas a sub-bacia de Sergipe há os folhelhos e calcilutitos do Membro Oiteirinhos, respectivamente.

Sequência Drifte: O estágio inicial desta sequência sedimentar foi em condições marinha restrita evoluindo para ambiente de mar aberto, consistindo basicamente de um grande ciclo transgressivo-regressivo. As barreiras que restringiam a entrada do oceano foram rompidas durante o Albiano, ocorrendo o desenvolvimento de sistema plataformar carbonático da Formação Riachuelo, onde na borda da bacia e nos blocos baixos depositavam-se os siliciclásticos grossos deltaicos do Membro Angico.

Durante a evolução da bacia do Neocenomaniano ao Coniaciano, ocorreu um grande evento transgressivo com a deposição em uma rampa carbonática representada pelos calcilutitos, folhelhos e margas inclusos na Formação Cotinguiba. Um rebaixamento do nível do mar e o desenvolvimento da discordância denominada Sub-Formação Calumbi ocorreu no final do Coniaciano, seguida de um evento transgressivo, o qual promoveu um afogamento do sistema carbonático, mudando o padrão de empilhamento para progradante, e deposição dos siliciclásticos das formações Calumbi e Marituba, e calcarenitos bioclásticos da Formação Mosqueiro, esta última depositada a partir do terciário. Sendo presente esta sedimentação progradante até o recente, subordinada a ciclos regressivos e transgressivos de baixa amplitude. Assim, em um destes eventos regressivos são depositados os sedimentos costeiros da Formação Barreiras presentes em todo o litoral.

3.2 Formação Penedo

Esta unidade estratigráfica foi definida primeiramente como “Membro Penedo” da Formação Japoatã, tomado pela cidade de Penedo (Alagoas) (Kreidler, 1948 *apud* Schaller, 1969). Sendo então, elevado a categoria Formação, no trabalho de Schaller (1969), e passou a englobar os clásticos encontrados sotopostos aos carbonatos da Formação Morro do Chaves, adjacentes aos conglomerados da Formação Rio Pitanga, e superpostos à seção de clásticos finos da Formação Barra de Itiúba.

Schaller (1969) caracteriza a Formação Penedo pelos seus espessos arenitos arcoseanos de fino a grosso, com grãos subangulares a subarredondados, mal selecionados, de coloração branca a cinzenta, e possuindo intercalações de folhelhos e siltitos. Estes ainda exibindo estratificações cruzadas de diferentes escalas em quase todos os corpos arenosos, e por vezes estruturas deformadas por gigantescas fluidizações. Um pontilhado branco é característico em seus depósitos, sendo dado pela alteração dos grãos de feldspato para caulim (Schaller, 1969; Feijó, 1994).

Sua distribuição deposicional é extensa por toda a bacia, de acordo Schaler (1969) pode haver afloramentos descontínuos desde o vale do rio Japaratuba (Sergipe) até o vale do rio Curipe, em Alagoas. Este mesmo autor, definiu o contato inferior com a Formação Barra de Itiúba, de carácter gradacional em Alagoas, e aparentemente discordante em Sergipe, marcado na base dos arenitos mal selecionados da Formação Penedo. E seu contato superior com a Formação Morro do Chaves é concordante (figura 4), e lateralmente, pode variar para os sedimentos da Formação Rio Pitanga quando próximos a borda de falhas da bacia.

Com idade Eocretácea, as rochas da Formação Penedo retratam depósitos de sistemas fluviais entrelaçados com frequente retrabalhamento eólico, sendo ainda reservatórios de gás no Campo de Pilar (Bizzi *et al.*, 2003; Ferreira (1990) *apud* Feijó, 1994). Fácies flúvias desta formação apresentam precárias características de reservatório quando comparadas às fácies eólicas, apresentando porosidades da ordem de 10% e baixíssima permeabilidade, devido a sua imaturidade textural e mineralógica. Enquanto as fácies eólicas apresentam características mais favoráveis de reservatório, com porosidade chegando a 15%. E grande parcela da reserva de gás do Campo de Pilar, da ordem de 7 bilhões de m³, encontra-se armazenada em reservatórios profundos da Formação Penedo, abaixo de 3.000 m (Bizzi *et al.*, 2003) (figura 5).

De acordo com a evolução tectono-sedimentar da bacia, a Formação Penedo é inserida na Supersequência Rife, de acordo com a revisão estratigráfica de Campos Neto *et al.* (2007), estando associada a Formação Pitanga na sub-bacia Sergipe. Enquanto em parte alagoana, ocorre concomitantemente a deposição deltáica-lacustre da Formação Barra de Itiúba. Sendo sua sucessão sedimentar relacionada a um final de um pulso tectônico, quando um significativo aumento do aporte sedimentar ocorre em relação à subsidência, e um assoreamento da bacia é dado por sedimentos fluviais preenchendo áreas de maior depressão (Campos Neto *et al.*, 2007).

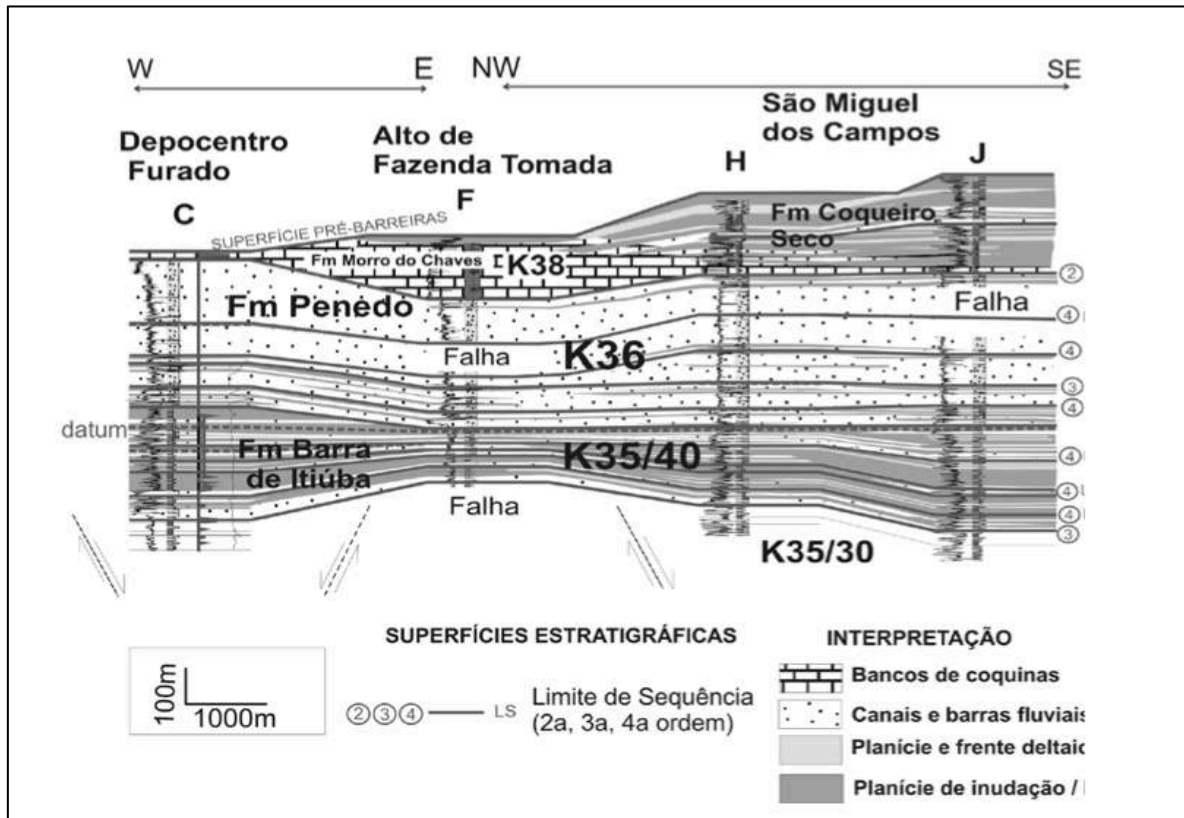


Figura 4. Seção estratigráfica de detalhe da Sequência representantes da fase Rife da Bacia de Sergipe-Alagoas, região de São Miguel dos Campos (Borba *et al.*, 2011).

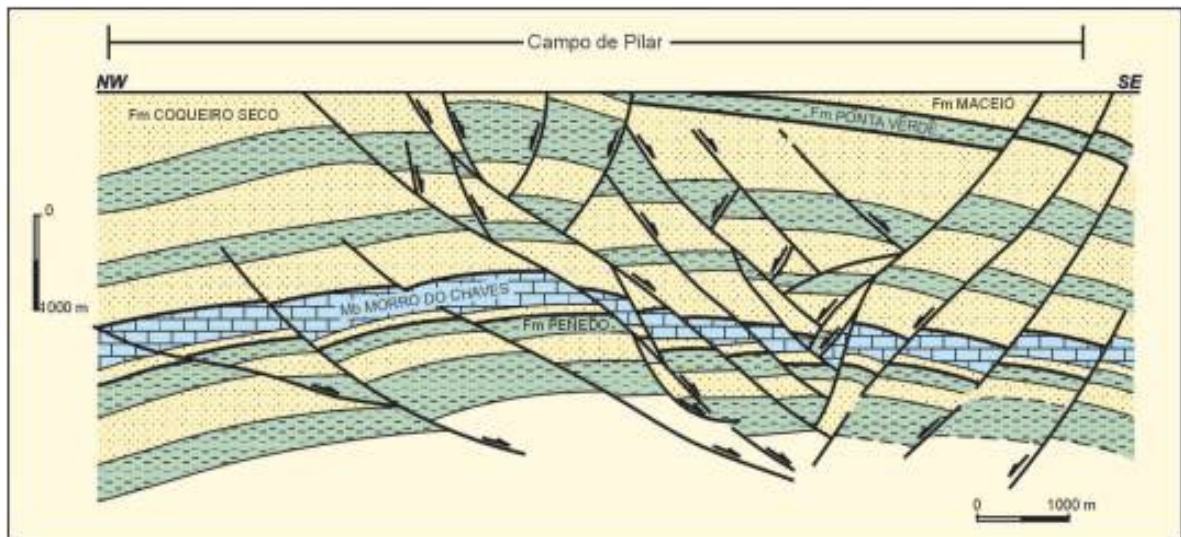
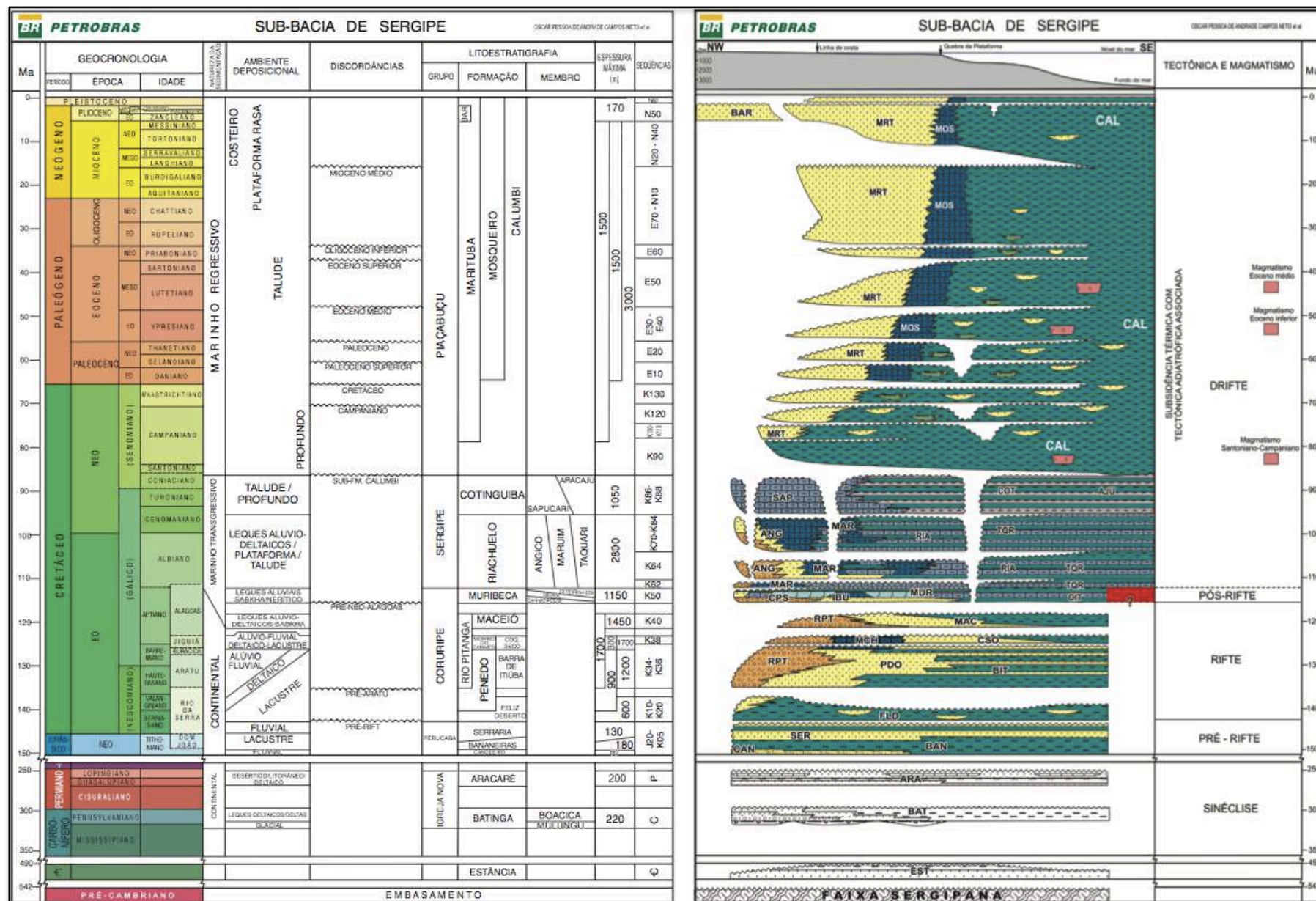
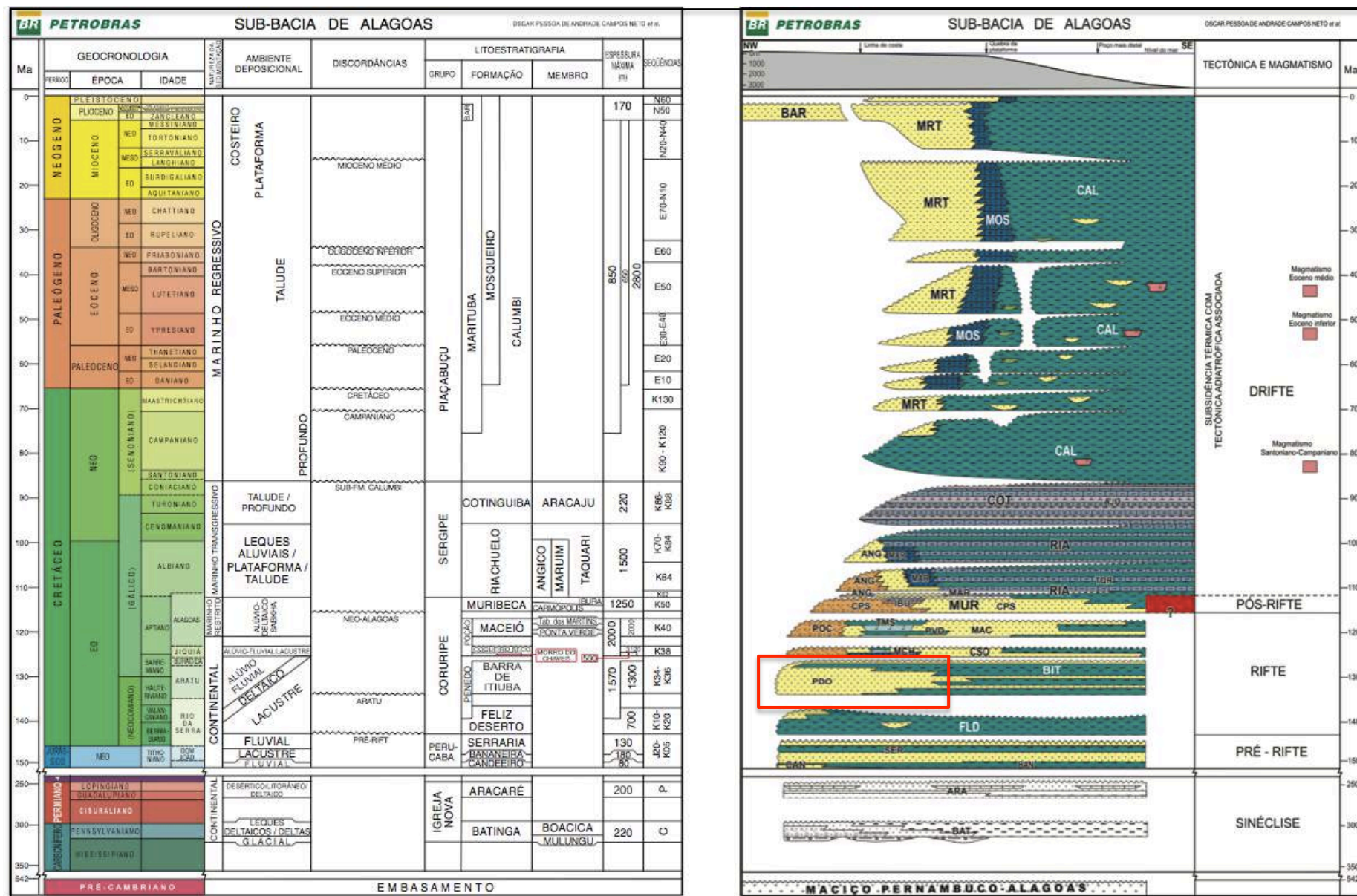


Figura 5. Seção geológica do Campo de Pilar, Bacia Sergipe-Alagoas (Borba *et al.*, 2009).





4. RESULTADOS

4.1 Caracterização litológica

Baseado nas características texturais, mineralógicas e nos contatos observados, foi possível identificar cinco intervalos litológicos distintos para a parte basal do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL (figura 8), denominados aqui de A, B, C, D e E, da base para o topo.

Intervalo A – Ocorre da profundidade de 202,60 m a 214,20 m. É o intervalo mais expressivo, sendo constituído predominantemente por arenitos médios a grossos, maciços e estratificados, cuja seleção varia de moderada a mal. Apresentam composição predominantemente arcoseana. Na base de algumas camadas areníticas é comum a ocorrência de sedimentos tamanho grânulos e seixos, além de intraclastos de argila. Camadas argilosas são praticamente ausentes, exceto por um intervalo decimétrico (10 cm) de lamito maciço, que ocorre na profundidade de 207,40 m.

Intervalo B – Ocorre da profundidade 201,30 m a 202,60 m. É constituído por camadas centimétricas de arenitos e lamitos (acamamento heterolítico), que exibem variadas estruturas sedimentares deformacionais (e.g. estruturas de carga sedimentar e falha). As camadas areníticas variam de areia grossa a fina, mal a moderadamente selecionados e são compostos predominantemente por quartzo, feldspatos e biotitas. Já as camadas lamíticas de coloração esverdeada, apresentam laminações plano-paralela e por vezes, aspecto maciço, são compostas predominantemente por argilominerais, micas e grãos de quartzo (tamanho silte e areia muito fina).

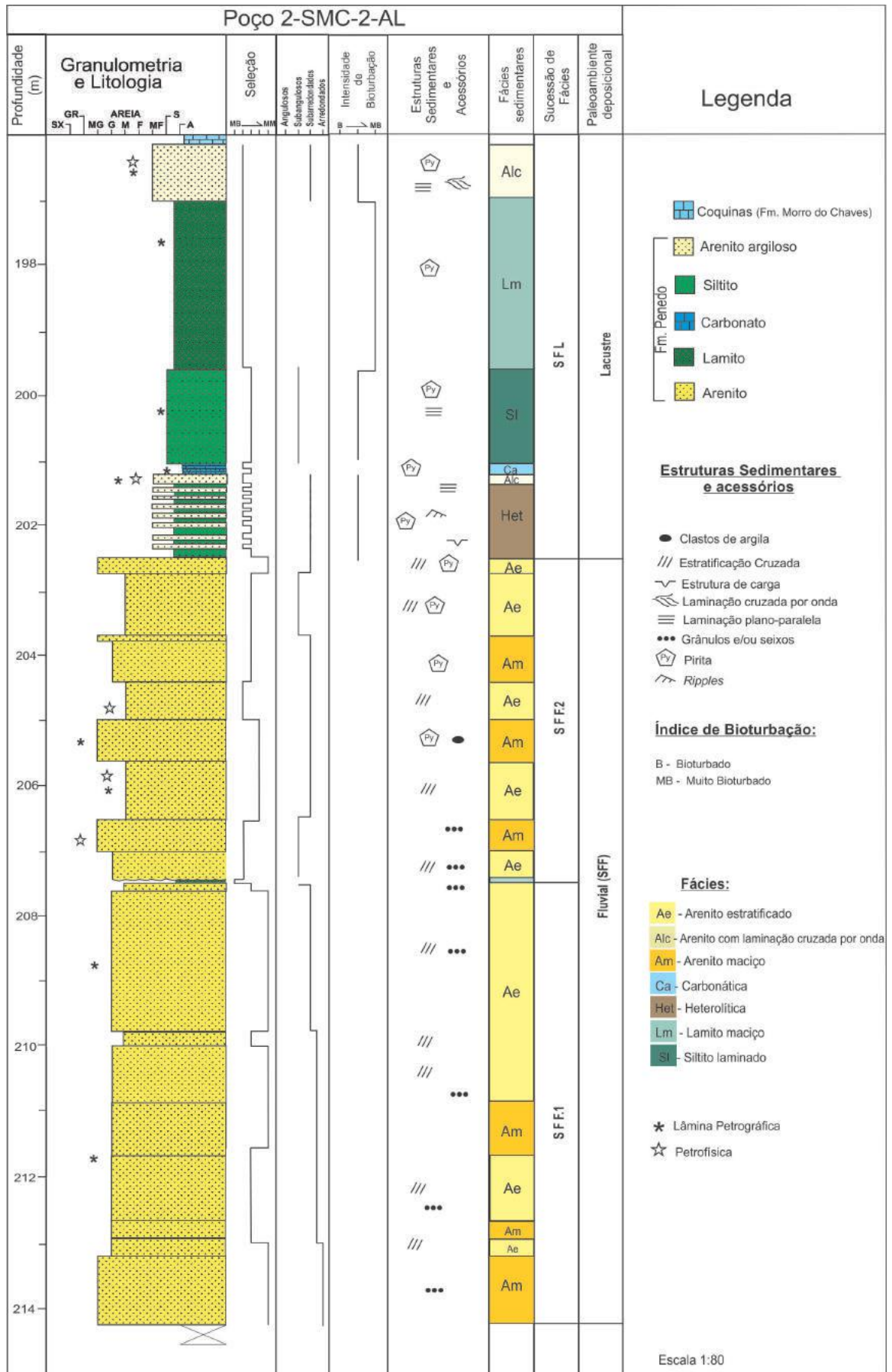


Figura 8. Perfil Estratigráfico para o intervalo siliciclástico basal do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL.

Intervalo C – Ocorre da profundidade de 201,00 m a 201,30 m, é caracterizado pela mistura de sedimentos siliciclásticos e carbonáticos. A parte superior, carbonática, é constituída predominantemente por conchas e fragmentos de conchas (coquinas) com uma matriz silicilástica areno-lamosa. Já a parte inferior da camada, apresenta maior percentagem de sedimentos silicilásticos (areia fina lamosa) com poucos grãos carbonáticos dispersos.

Intervalo D – Ocorre da profundidade de 197,00 m a 201,00 m. É caracterizado por lamitos maciços e siltitos arenosos laminados, de cores cinza esverdeada, variando de moderada a bem selecionados. Apresenta moderado índice de bioturbação. É composto predominantemente por argilominerais e quartzo, micas (muscovita e biotita) e sulfeto de ferro (pirita) ocorre subordinadamente.

Intervalo E – Ocorre da profundidade de 196,20 m a 197,00 m. É caracterizado por arenito muito fino micáceo com laminações cruzadas por onda, ligeiramente argiloso e bem selecionado. Apresenta grãos subangulosos e moderado índice de bioturbação. É composto predominantemente por quartzo, feldspato e biotita. Muscovitas e sulfeto de ferro (pirita), ocorrem subordinadamente.

4.2 Fácies sedimentares

Foram caracterizadas sete fácies, sendo apresentada para cada fácies, uma diagnose e uma interpretação para o processo de transporte e deposição (Quadro 1), além de uma sinonímia de fácies já existente na literatura, quando pertinente. Sendo reconhecidas três fácies areníticas (Alc, Ae e Am), duas lutíticas (Sl e Lm), uma heterolítica (Het) e uma carbonática (Ca).

Quadro 1. Síntese das fácies do intervalo basal do testemunho de sondagem, com suas respectivas diagnose e interpretação.

	CÓDIGO	DIAGNOSE	INTERPRETAÇÃO	% (percentual no perfil estratigráfico)	GRUPO PETROGRÁFICO
ARENÍTICAS	Alc	Arenito fino com laminação cruzada por onda	Migração de marcas onduladas por fluxo oscilatório (onda)	5%	I
	Ae	Arenito médio a grosso com estratificação cruzada planar	Migração de barras arenosas por fluxo hidrodinâmico trativo unidirecional (correntes) em regime de fluxo inferior	34%	IV
	Am	Arenito grosso maciço	Fluxo hidrodinâmico trativo em regime de fluxo inferior	28%	IV
HETEROLÍTICA	Het	Intercalações de lamito e arenito	Alternância de fluxos trativos em regime de fluxo inferior e decantação de finos	7%	-
LUTÍTICAS	Sl	Siltito laminado	Alternância de decantação e fluxos hiperpicnais	11%	II
	Lm	Lamito maciço	Decantação	14%	II
CARBONÁTICA	Ca	Arenito bioclástico e Coquina com matriz silicilástica	Retrabalhamento de bancos carbonáticos (coquinas) por fluxos trativos com influxo de material siliciclástico	1%	III

4.2.1 Fácies areníticas

Foram reconhecidas três fácies areníticas, sendo um arenito muito fino com laminação cruzada por onda (Alc) presente no topo do intervalo, e um padrão alternado de arenitos grossos com estratificação cruzada planar (Ae) e maciços (Am) reconhecidos na base do intervalo silicilástico do testemunho de sondagem.

Designação – *Fácies Alc*

Diagnose – Arenito com laminação cruzada por onda.

Descrição – Arenitos de granulometria fina (areia muito fina a fina), com grãos angulosos, moderadamente a bem selecionados e com coloração acinzentada (10G/7/2), que exibem laminações cruzadas de onda, frequentemente marcadas pela presença de micas. Essa fácies apresenta composição quartzo-feldspática, alta percentagem de biotitas e índice de bioturbação variando de baixo a moderado. Intraclastos de argila, por vezes, com nódulos de sulfeto de ferro (pirita), podem ocorrer na base das camadas (figura 9A).

Interpretação – Migração de marcas onduladas por fluxo oscilatório (onda).

Discussão – A fácies Alc abrange aproximadamente 5% da seção de estudo (cerca de 90 cm) (figura 8). As laminações cruzadas por onda indicam deposição em um ambiente de alta energia com alta taxa de aporte sedimentar, fato atestado pela ocorrência de diversas estruturas biogênicas de escape, observadas no topo das camadas. Segundo Smith & Carroll (2015), fácies com características similares podem estar associadas a depósitos de barras de desembocadura ou margens de sistemas lacustres retrabalhados por ação de ondas, embora seja difícil sua distinção no registro geológico. Sendo então, a fácies Alc correlacionada aqui aos arenitos com laminação cruzada gerada por onda descritos por Martel & Gibling

(1991) na Formação Horton Bluff (Canadá), os quais são interpretados como depósitos de margens de lago (*nearshore*). E ainda, podendo ser correlata às fácies AFhk (arenito muito fino com laminação truncada por ondas), descrita por Borba *et al.* (2009), para os depósitos arenosos da seção Sinrifte no Campo de Furado.

Designação – Fácies Ae

Diagnose – Arenito de granulometria média a grossa com estratificação cruzada planar.

Descrição – Arenitos médios a grossos, arcoseanos, de coloração acinzentada (5GB/6/2, 10G/8/2), variando de moderadamente a mal selecionados, cuja espessura das camadas varia de decimétrica a métrica. Os intervalos mal selecionados apresentam frequentemente grãos de quartzo e litoclastos de composição granítica, cuja granulometria varia de grânulo a seixo fino. As estratificações são marcadas pela variação granulométrica dos sedimentos ou por minerais máficos (biotita) (figura 9B).

Interpretação – Fluxo trativo unidirecional com migração de dunas arenosas de crista reta.

Discussão – A fácies Ae compõe aproximadamente 34% da seção de estudo, sendo representantes da parte basal do intervalo (202,60 a 211,20), estando intercalados à fácies Am (Arenitos maciços). Sua textura e a presença de estratificações cruzadas sugerem que essa fácies foi depositada em um ambiente com regime de fluxo inferior, com alto aporte sedimentar, através da migração de dunas arenosas de crista reta por fluxos trativos unidirecionais (correntes). Esta fácies pode ser correlacionada às fácies AMxi e AGxi descrita no trabalho de Borba *et al.* (2009), como arenitos médios e grossos arcoseanos com estratificação

cruzada. E de acordo com as fácies de Miall (1996), esta fácies poderia ser correlata a fácies St.

Designação – *Fácies Am*

Diagnose – Arenito grosso a muito grosso maciço.

Descrição – Arenitos grossos arcoseanos maciços, de coloração acinzentada (10B/7/2) com grãos subarredondados, com granulometria variando de areia grossa a seixo fino, e uma seleção moderada a ruim. são compostos por quartzo, feldspato e micas (biotita e muscovita) como mineral acessório. Sendo ainda comum a presença de intraclastos de argila e litoclastos de rocha metamórfica em suas camadas (figura 9C).

Interpretação – Fluxo hidrodinâmico trativo em regime de fluxo inferior.

Discussão – A fácies Am abrange 28% do perfil estratigráfico e encontra-se na parte basal intercalada à fácies Ae. Seus grãos subarredondados são indicativos de transporte sedimentar e sua composição semelhante aos arenitos estratificados da fácies Ae, sugerem sedimentação vinda de carga fluvial. Intraclastos de argila são indicativos de retrabalhamento, incorporando depósitos intrabaciais em sua sedimentação. Correlaciona-se à fácies AGma de Borba et al. (2009); e à fácies Sm de Miall (1996), e a fácies Am2 de Ramos *et al.* (2006) em depósitos da bacia de Resende como produto de desaceleração de fluxos não confinados, durante enchentes, ou em estágios de avulsões em canais entrelaçados. Sendo ainda interpretados por Feijó (1994) como produto de alteração pós deposicionais (fluidizações) na Formação Penedo.

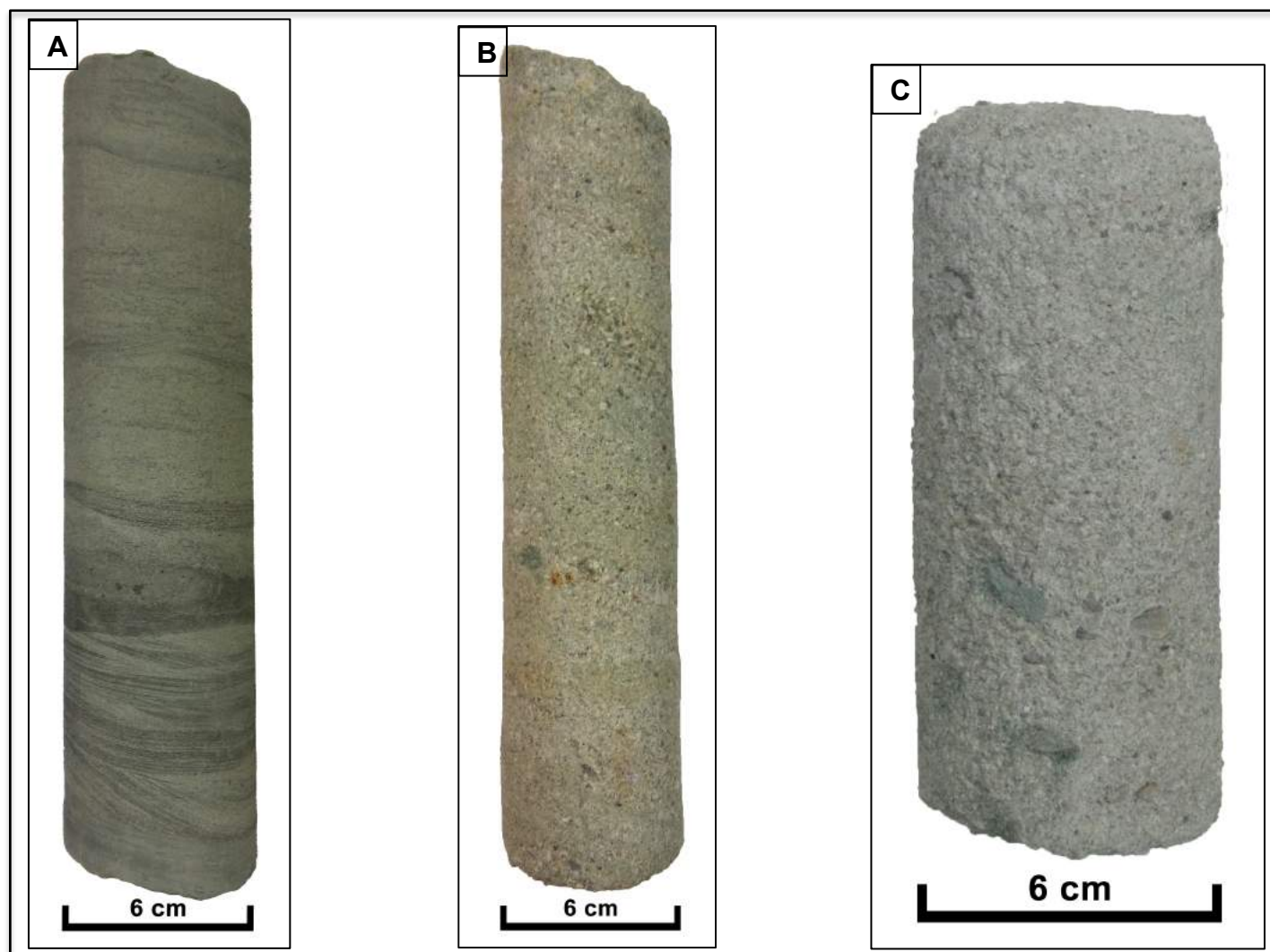


Figura 9. Aspectos macroscópicos das fácies areníticas no testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL. (A) Fácies Arenito com laminação cruzada de onda-Alc (196,80 m); (B) Fácies Arenito estratificado-Ae (207,80 m) e (C) Fácies Arenito Maciço-Am (213,40 m).

4.2.2 Fácies heterolítica

Esta fácies é caracterizada por repetidas intercalações de lamito e arenito. Localizada no intermédio (201,30 m a 202,60 m) entre as fácies lutíticas do topo, e as fácies areníticas da base do perfil.

Designação – *Fácies Het*

Diagnose – Intercalações de lamito e arenito.

Descrição – Camadas centimétricas de lamito esverdeado (10G/5/2) intercaladas a arenitos quartzosos cuja granulometria pode variar de muito fino a grossa, apresentando um acamamento lenticular (5GB/6/2). Esta fácies exibe uma diversificada gama de estruturas sedimentares trativas (laminação plano-paralela, laminação cruzada, e ondulação assimétrica) (figura 10), deformacionais (carga e chama) e biogênicas, que por vezes, obliteram estruturas sedimentares primárias. Em algumas partes é possível notar a ocorrência de falhas, deslocando camadas (Figura 10A). Nas camadas areníticas de granulometria mais grossa (arenito grosso) é comum a presença litoclastos e intraclastos de argila, além de nódulos com concentração de sulfetos.

Interpretação – Alternância entre processos trativos em regime de fluxo inferior e decantação de sedimentos finos.

Discussão – Esta fácies apresenta-se entre um intervalo superior, caracterizado por sedimentos lamosos, e um intervalo inferior com predominância de arenitos, sendo então uma fácies desenvolvida em uma transição entre dois ambientes sedimentares. Os sedimentos mais finos representam a predominância do processo de decantação de um ambiente lacustre, enquanto camadas mais areníticas caracterizam épocas de maior descarga fluvial, onde sedimentos de granulometria

mais grossa tem um maior alcance através de fluxos hidrodinâmicos trativo. Talbot & Allen (1996) sugerem uma variação climática como condicionante na maior ou menor entrada de descargas fluviais no sistema deposicional. E as estruturas de carga sedimentar, indicam deformações sindeposicionais, devido ao peso do sedimento arenoso acima de camadas lamífticas.

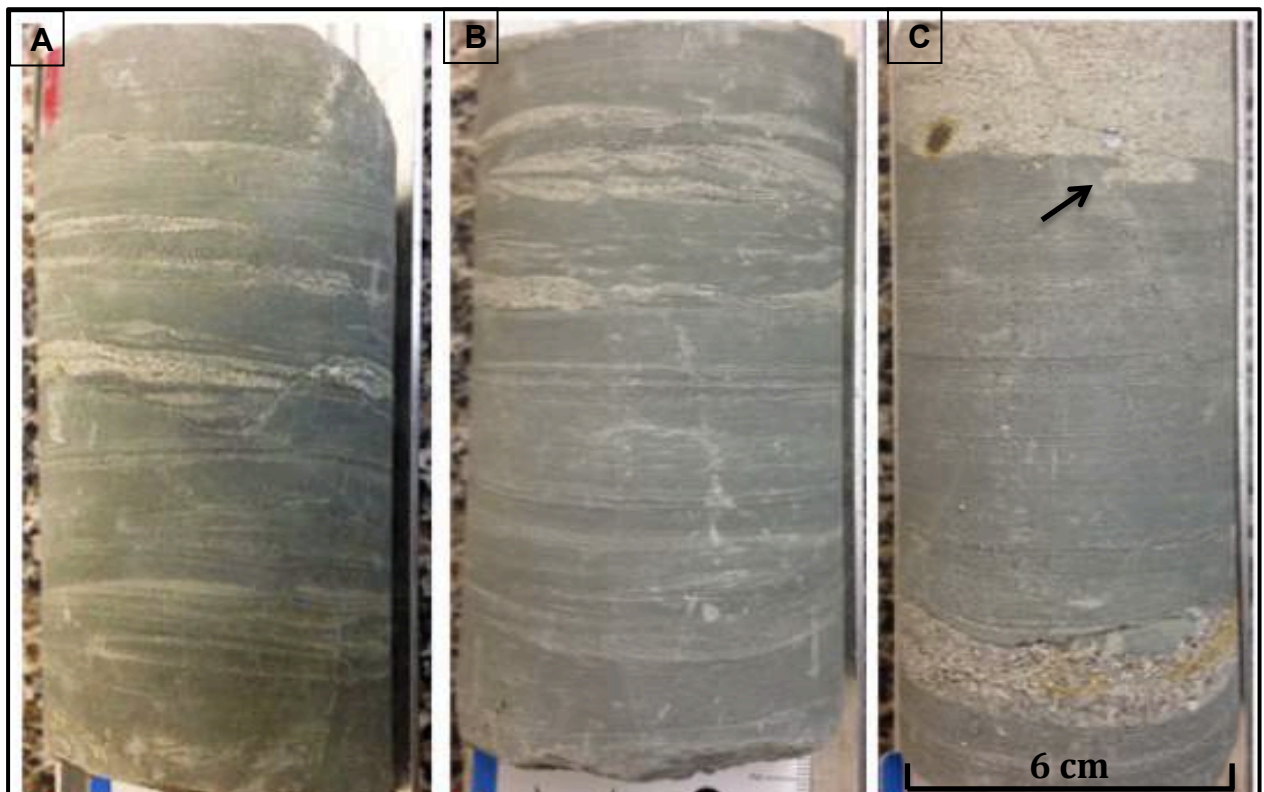


Figura 10. Variações da facies heterolítica (Het) no testemunho do poço 2-SMC-2-AL. A) falha; B) microrondulações assimétricas (*Ripples*) e laminações plano-paralela; e C) estruturas de carga (seta preta).

4.2.3 Fácies lutíticas

As rochas lutíticas estão presentes na parte superior do intervalo siliciclástico do testemunho, e foram classificadas de acordo à classificação de Folk (1968) como um siltito arenoso e um lamito junto as descrições petrográficas.

Designação – Fácies SI

Diagnose – Siltito com laminação plano-paralela.

Descrição – Siltito arenoso laminado de coloração esverdeada (10G/5/2) e moderadamente bioturbado (figura 11A). Apresenta laminações de espessura milimétrica, constituídas por areia muito fina angulosa de composição essencialmente quartzosa (figura 14B). Pirita ocorre de forma dispersa ou concentrada em biturbações.

Interpretação – Decantação dos sedimentos finos e subordinadamente as correntes turbulentas subaquosas diluídas desacelerantes (“hiperpicnais distais”).

Discussão – Esta fácies é interpretada como oriunda de um paleoambiente lacustre intermediário a distal, sujeito a ação de fluxos trativos episódicos. Em alguns casos, a ação biogênica pode reelaborar o substrato, favorecendo assim a homogeneização do substrato (siltito arenoso). Schieber (2003) advoga que estas laminações também podem ser associadas a eventos erosivos, sugerindo assim, a ação de correntes de fundo atuando no substrato e gerando possivelmente uma pequena perda do registro estratigráfico. A presença de sulfetos (pirita) pode estar associada a condições disóxicas/anóxicas (redutoras). Esta fácies SI pode ser associada à fácies F3 de Smith & Carroll (2015), descrita como uma rocha lamítica apresentando laminações paralelas depositada em um ambiente com limitadas descargas fluviais.

Designação – Fácies Lm

Diagnose – Lamito maciço.

Descrição – Lamito com coloração cinza esverdeado (10G/5/2 e 5GB/6/2) (Figura 11B), um alto índice de bioturbação. Possuindo em menores quantidades uma

areia muito fina subangular essencialmente quartzosa. Esta fácies apresenta sulfetos por todo o seu intervalo.

Interpretação – Decantação de argila e silte.

Discussão – A partir da descrição desta fácies, pode ser interpretada como um processo de decantação de sedimentos mais finos. Esta localizada acima da fácies Sl, o que mostra um maior distanciamento das margens do lago, em direção a uma sedimentação mais de fundo de lago, com pouca sedimentação de carga fluvial. A presença de sulfetos (pirita) indica condições redutoras neste ambiente. A fácies Lm é correlata a fácies F2 de de Smith & Carroll (2015), apresentando rochas lamíticas maciças estando associadas à fácies F3.

4.2.4 Fácies carbonática (Ca)

Sendo um intervalo de tamanho centimétrico, porém com uma singularidade composicional dada por uma mistura de constituintes intrabaciais e extrabasais.

Designação – *Fácies Ca*

Diagnose – Arenito bioclástico gradando até uma coquina com matriz siliciclástica.

Descrição – A base do intervalo carbonático é composto por um arenito muito fino, de composição quartzosa, subangular, com alta argilosidade e coloração esverdeada (5GB/6/2). Apresenta em torno de 20% de constituintes bioclásticos (bivalves) (figura 11C), com conchas de tamanho seixo médio, em sua maioria não articuladas e não fragmentadas. Gradando em direção ao topo, para rochas com maiores teores de constituintes intrabaciais, e com um empacotamento mais fechado. Chegando o topo ser caracterizado por uma coquina (70% de grãos carbonáticos) de coloração acinzentada (5GB/7/2), com apenas 30% de matriz

areno-lamosa (siliciclástica). Suas conchas apresentam tamanho seixo médio, com uma orientação concordante e perpendicular, não estando fragmentadas. Assim, a parte superior do intervalo carbonático pode ser classificado segundo Borghi *et al.* (2015) como um *Muddy densestone*.

Interpretação – Retrabalhamento de bancos carbonáticos (coquinas) por fluxos trativos com influxo de material siliciclástico.

Discussão – Esta fácies é encontrada apenas entre as profundidades de 201,00 m a 201,30m no perfil estratigráfico, localizada logo após a fácies Het e Alc. É Interpretada como um evento episódico, associado a fluxos fluviais que reelaboram bancos carbonáticos (bioclásticos) próximos, e transportando sedimentos silicilásticos e retrabalhando o material bioclástico. Pode ser associada as fácies Cfi e Cmi do trabalho de Tavares *et al.* (2015) relacionadas a depósitos de coquinas com retrabalhamento por fluxos trativos a partir de influxos fluviais, em um domínio lacustre intermediário.

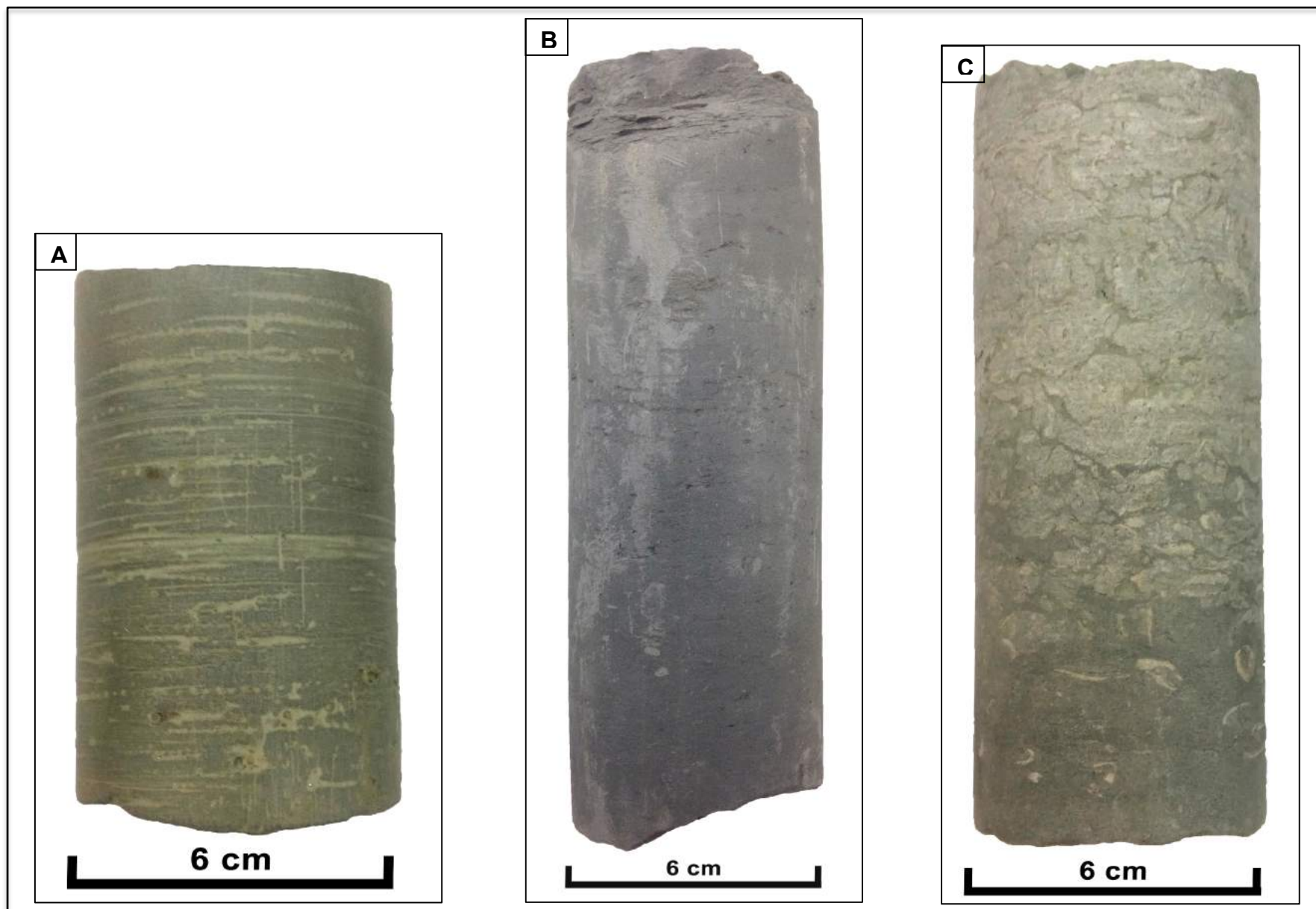


Figura 11. Fácies lutíticas e Carbonática. (A) Fácies siltito laminado (Sl), (B) Fácies lamito maciço Fácies Lm) e (C) Fácies carbonática (C – fácies Ca).

4.3 Imagens de raios-X

Foram selecionadas 13 amostras nas fácies areníticas e lamíticas para análise de raios-X, afim de reconhecer estruturas sedimentares primárias, cuja a visualização não é clara em amostra de mão. Deste modo, o auxílio das imagens de raios-X foi importante no reconhecimento de fácies onde a diagnose fosse a presença ou ausência de estrutura, como nas fácies Ae, Am, Sl e Lm.

Nas amostras areníticas pode-se reconhecer partes estratificadas (Ae), com uma organização preferencial dos grãos, e partes maciças (Am) (figura 12A e B). Já as amostras lamíticas, a estrutura é vista por lâminas de um material de granulometria mais grossa (possivelmente, areia fina – figura 13C) e amostras maciças apresentam apenas fraturas (figura 13D).

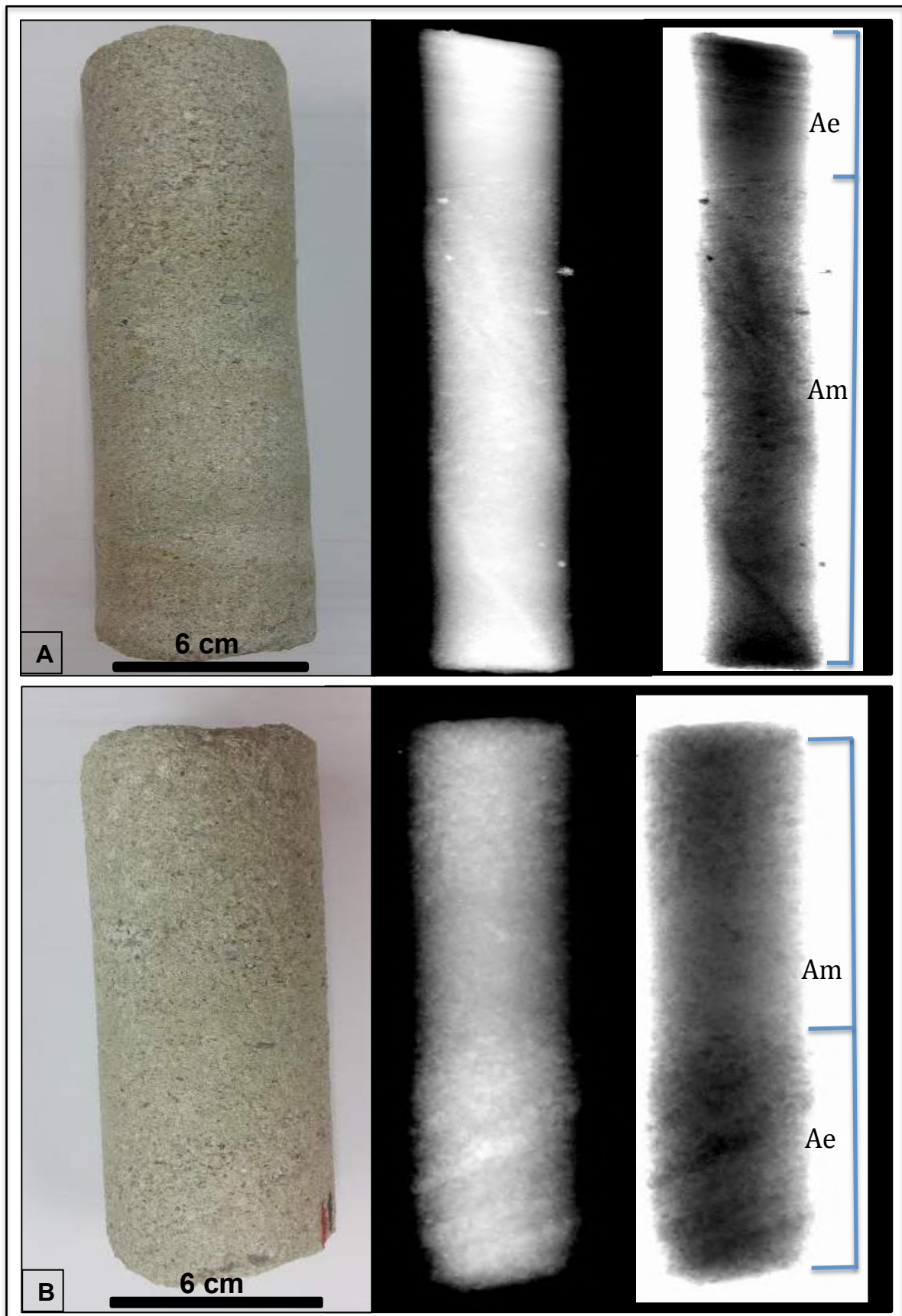


Figura 12. Fotografia (à esquerda) e Imagens de raio X (à direita) com arenito estratificado (Ae) e arenito maciço (Am). Profundidade das amostras: (A) 206,40m a 206,80m e (B) 212,25m a 212,45m.

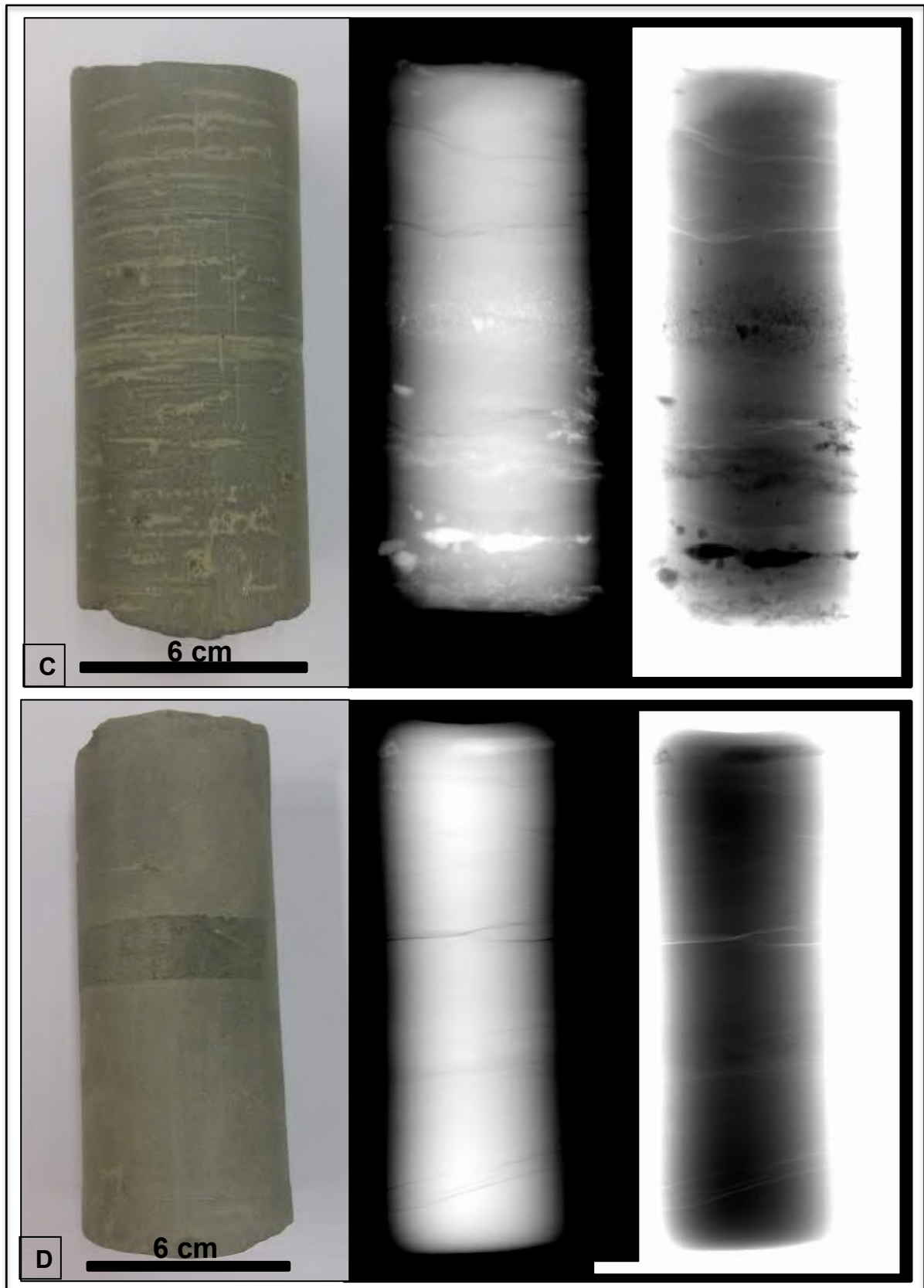


Figura 13. Fotografia (à esquerda) e Imagens de raio X (à direita) das amostras: (C) Siltito laminado (197,15 a 197,30m) e (D) Lamito maciço (199,10 a 199,35m).

4.4 Análise petrográfica

Uma descrição petrográfica quantitativa foi realizada para nove lâminas, as quais são representantes das fácies sedimentares caracterizadas nesse estudo. As amostras estudadas foram agrupadas devido suas semelhanças em relação aos constituintes primários, diagenéticos e tipos de poros. Dessa forma, foram denominados quatro grupos, sendo eles: I, II, III e IV.

O **grupo I** contém as lâminas das fácies Alc nas profundidades de 196,65 m e 201,25 m. Texturalmente, apresentam granulometria variando de areia muito fina a fina, com grãos subangulares, e uma seleção moderada a boa. Possuem um empacotamento apertado e os contatos são em grande maioria, côncavo-convexos. Apresentam uma laminação cruzada marcada por biotita (figura 14 A).

Os constituintes primários são predominantemente quartzos monocrystalinos (volume total 56-50%, média 53%), enquanto os policristalinos ocorrem em proporção menor variando entre 5 a 6%. Microclínio (vol. total 3-5%, média 4%), ortoclásio (vol. total 1-3%, média 2%), e plagioclásio (vol. total 0-2%, média 1%), estão parcialmente dissolvidos e substituídos por argilominerais. Biotita (vol. total 12-20%, média 16%), muscovita (vol. total 1-2%, média 1.5%) e intraclasto argiloso (vol. total 0.5-1%, média 0.75%) ocorrem subordinadamente.

Como constituintes diagenéticos, apresentam um argilomineral indiferenciado autigênico (vol. total 6-7%, média 6,5 %) intergranular preenchendo poros. E ainda, carbonato diagenético (vol. total 3-4%, média 3.5%) e pseudomatriz argilosa (vol. total 1-2%, média 1.5%) resultante da compactação mecânica de grãos argilosos, obliterando a porosidade primária. Em um percentual traço possuem minerais de titânio, e sulfetos diagenéticos (pirita) substituindo grãos de biotita (constituente primário).

E de acordo com Folk (1968) e junto ao resultado do percentual dos constituintes primários, estas amostras areníticas foram classificadas como um subarcóseo (figura 15).

O **grupo II** é composto pelas lâminas das fácies lutíticas, fácies Lm (197,95 m) e SI (200,40 m). Estes lutitos apresentam grãos de quartzo monominerálico (vol. total 18-30%, média 1.5%) e microclínio detrítico (vol. total 0.5-1%, média 0.75%) de granulometria areia fina, com baixa esferecidade, e arredondamento angular e apresentando uma boa seleção destes grãos. Biotita, muscovita, clorita subordinadamente. E ainda pirita diagenética com hábito granular e acicular foram reconhecidos como minerais acessórios deste grupo.

A lâmina delgada de profundidade 197,95 m apresentou uma razão percentual de silte e argila próxima a 2/3 podendo ser classificado segundo Folk (1968) como um lamito. Enquanto para a lâmina de 200,40 m foi reconhecido um percentual maior de silte e areia, sendo então, classificado como um siltito com uma laminação dada por finas lâminas de areia fina quartzosa (figura 14 B). Podendo caracterizar duas fácies distintas, uma composta por um lamito maciço (Lm) e uma segunda por um siltito laminado (SI).

O **grupo III** é composto pela lâmina petrográfica na profundidade 201,25 m, correspondente a parte basal da fácies carbonática (Ca) (figura 14 C). Ocorre uma mistura de constituintes nesta lâmina, sendo composto por 20% de constituintes bioclastos (bivalves) e 70% constituinte siliciclástico de granulometria areia muito fina, subangulosa sendo: 32% quartzo monocristalino, 20% biotita, 8% intraclasto argiloso, 5% muscovita, 3% quartzo policristalino, 2% opaco (pirita autigênica – grãos com arestas bem formadas); e 10% de calcita poiquilotópica. As conchas variam de grânulo

a seixo médio, não articuladas e não fragmentadas, com uma orientação variada e um empacotamento frouxo.

Como constituintes diagenéticos foi descrito o mesmo argilomineral autigênico indiferenciado dos arenitos descritos para o grupo I, e ainda uma pseudomatriz argilosa (figura 14 D) formada pela compactação mecânica de grãos argilosos, preenchendo espaços interpartículas e reduzindo a porosidade primária. E ainda obliterando a porosidade, um cimento de calcita poiquilotópica é reconhecido nas proximidades dos bioclastos.

De acordo com Folk (1968) este é classificado como um quartzo-arenito com fragmentos bioclásticos.

Na parte basal do testemunho é encontrado o **grupo IV**, o qual contém as lâminas das fácies Ae (205,15 m e 208,90 m) e Am (205,30 m e 211,85 m). Texturalmente, possuem granulometria variando de areia muito fina a seixo, com uma moda de areia média a grossa, moderado a mal selecionado, e grãos subarredondado. Apresentam um empacotamento normal e possuem contatos longos e por vezes, suturados.

Possuem como constituintes primários, quartzo monocristalino (volume total 28-40%, média 34%) e quartzo policristalinos (vol. total 8-26%, média 17%), microclínio (vol. total 4-10%, média 7%), ortoclásio (vol. total 2-3%, média 2.5%), e plagioclásio (vol. total 0-7%, média 3.5%), parcialmente dissolvidos e substituídos por argilominerais, alguns apresentam sericita proveniente da fonte (interpretada como constituinte primário). Como elementos acessórios encontra-se biotita (vol. total 0-2%, média 1%), muscovita (vol. total 0-0.5%, média 0.25%), e subordinadamente litoclastos de chert.

Como constituintes diagenéticos apresentam argilomineral indiferenciado autigênico (figura 14 G,I,J) (vol. total 12-14%, média 13%) intergranular preenchendo

poros, carbonato diagenético (vol. total 0-1%, média 0.5%) e ainda, pirita diagenética substituindo biotita (figura 14 E). Sobrecrecimento em grãos de feldspato (figura 14 E,F,H) é bastante comum, e por vezes sendo observado em grãos de quartzo.

De modo a classificá-los a partir dos percentuais dos constituintes primários de acordo segundo Folk (1968), estas são denominadas arcóseos.

De modo geral, as fácies areníticas são compostas por arcóseos e subarcóseos, confirmando o que havia sido observado nas descrições macroscópicas, e pela coloração cinza-esbranquiçada das amostras. Feições diagenéticas e de compactação são reconhecidas, podendo sugerir uma inicial interpretação de ambiente diagenético destas rochas sedimentares. Como por exemplo, contatos suturados levam a uma interpretação de uma compactação química, e a formação de pseudomatriz argilosa sugere uma compactação mecânica vigente nestas rochas. Em amostras mais profundas, o sobrecrecimento presente nos grãos de quartzo e feldspato não são contínuos, não sendo possível afirmar se essas feições são antecedentes a compactação. Worden & Burley (2003) sugerem que grande porcentagem de argilominerais, tem grande relação com perfis de alteração de ambientes de depósitos fluvio-deltáicos em profundidade rasa (eodiagênese). Assim como proposto por Nelson (1994), uma grande circulação de água intersticial ocorre em depósitos com granulometria mais grossas e uma maior permeabilidade como visto em depósitos de rio entrelaçados. A alteração de minerais mais instáveis (como feldspatos e micas) levaria a formação de argilominerais diagenéticos (Nedkvitne and Bjørlykke, 1992). Logo, o grande volume de um argilomineral autigêneo indiferenciado intergranular, descrito na maioria das amostras, segundo esses autores sugere uma precipitação precoce ou rasa destes argilominerais, em um ambiente eodiagenético continental.

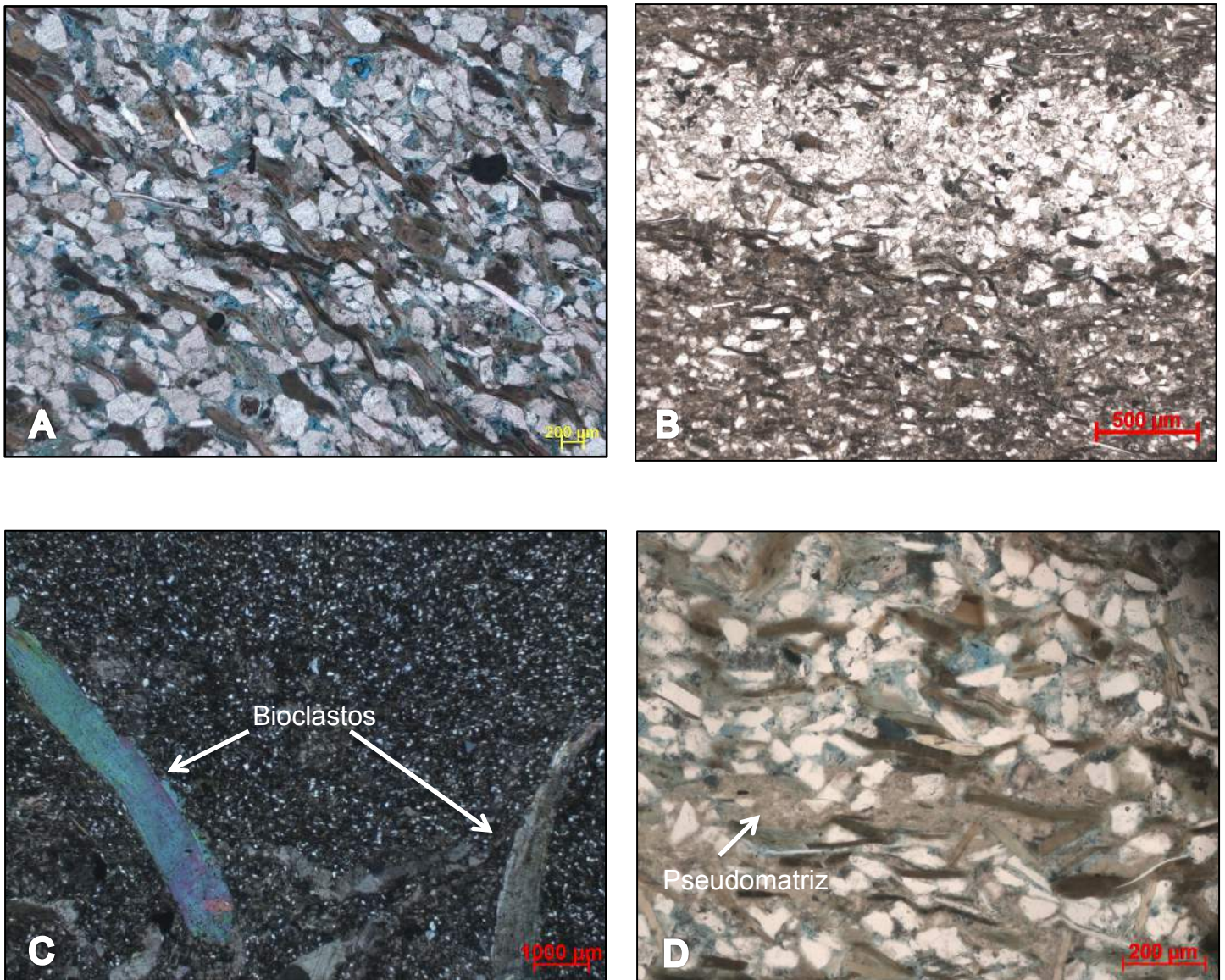


Figura 14. Principais texturas, estruturas e arcabouço das amostras analisadas.

Fotomicrografia (A): Arenito muito fino, grãos subangulares, e uma orientação dos cristais de biotita. NP (Nicol Paralelo). Zoom 10X. Profundidade de 196,65m.

Fotomicrografia (B): Lamito arenoso com laminação marcada por lâminas de areia fina. NP. Zoom 20X. prof. 200,40m.

Fotomicrografia (C): Visão geral da lâmina de arenito bioclástico. NC (Nicol Cruzado). Zoom 1,25X. prof. 201,25m.

Fotomicrografia (D): Detalhe do arcabouço do arenito bioclástico, e sua pseudomatrix argilosa (seta branca). NP. Zoom 10X. prof. 201,25m.

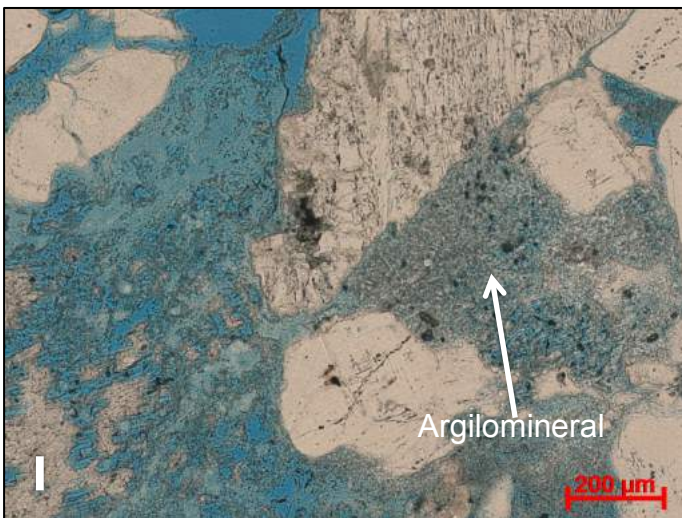
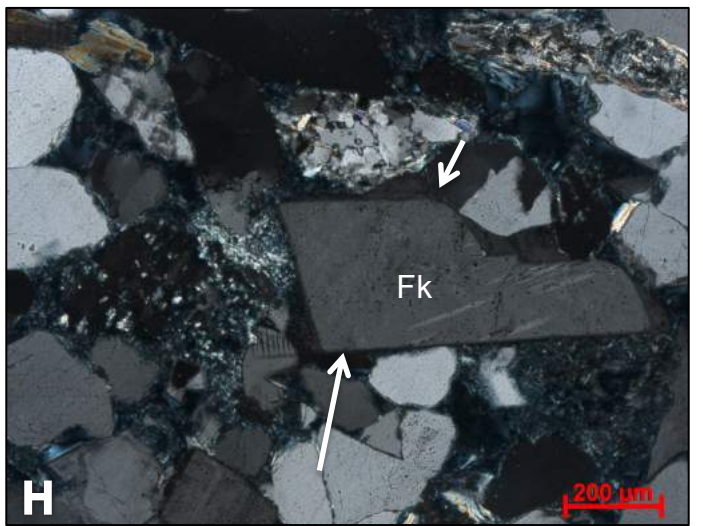
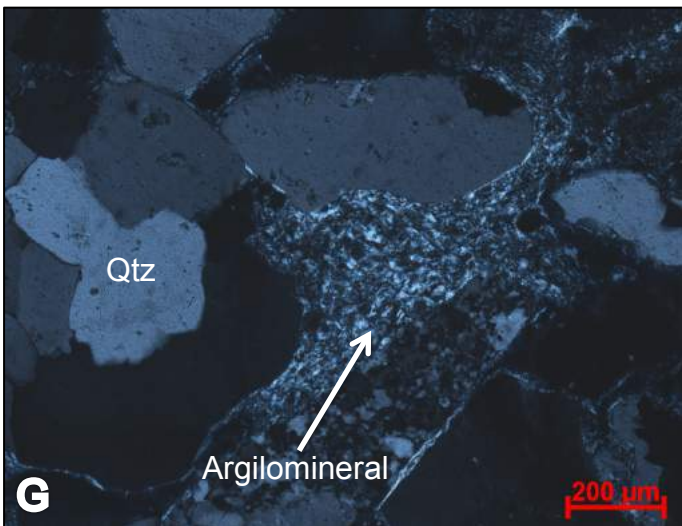
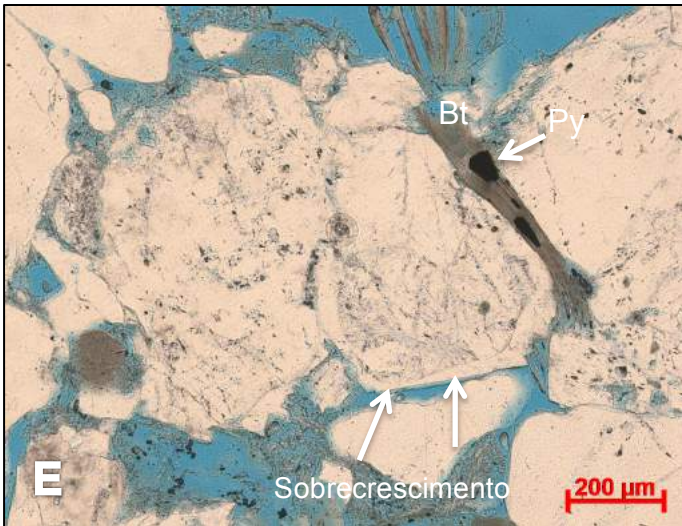


Figura 14. Fotomicrografia (E): Sobrecrecimento em cristais de microclínio (seta preta) e pirita com crescimento em cristais de biotita (seta branca). NP. Zoom 10X. prof. 205,30m.

Fotomicrografia (F): Sobrecrecimento em cristais de feldspatos (seta preta) e substituição de pirita (Py) em cristais de biotita (Bt) NC. Zoom 10X. prof. 205,30m.

Fotomicrografia (G): Arenito grosso, subarredondado, com detalhe para o cimento de argilomineral autigênico indiferenciado (seta azul). NC. Zoom 10X. prof. 208,90m.

Fotomicrografia (H): Sobrecrecimento em cristais de feldspato potássico (Fk). NC. Zoom 10X. prof. 206,15m

Fotomicrografia (I): Alteração em cristais de microclínio (Mcl), e formação de argilomineral autigênico indiferenciado NP. Zoom 10X. prof. 205,30m.

Fotomicrografia (J): Alteração em cristais de microclínio, e formação de argilomineral autigênico indiferenciado NC. Zoom 10X. prof. 205,30m.

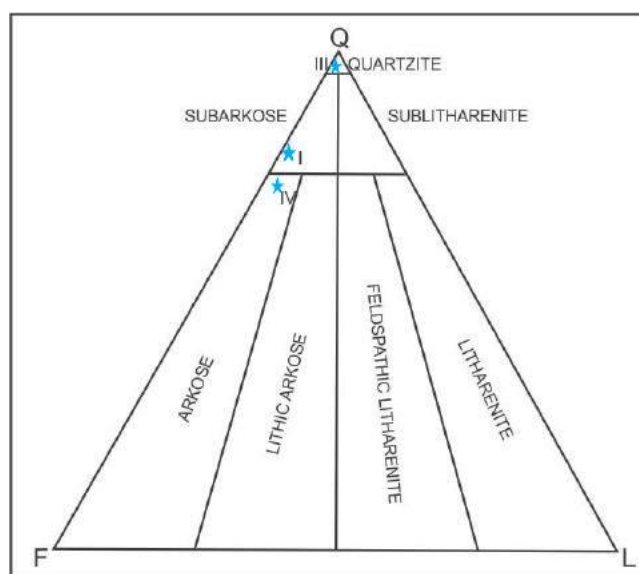


Figura 15. Diagrama de Folk (1968) com os grupos petrográficos I, III e IV.

4.5 Sucessão de fácies

A partir do empilhamento das sete fácies descritas acima, o intervalo siliciclástico pode ser dividido em duas principais sucessões litofaciológicas. A primeira predominantemente arenosa (214,40 m – 202,60 m), interpretada como uma sucessão de fácies característica de um depósito fluvial (SFF), e uma segunda predominante lamosa (202,60m – 196,20m) correlacionada a um depósito lacustre (SFL).

SUCESSÃO DE FÁCIES FLUVIAL (SFF)

A sucessão de fácies SFF é caracterizada predominantemente por arenitos médios a grossos, arcoseanos ou micáceos, estratificados (Ae); arenitos maciços (Am) e, localmente, lamito maciço (Lm).

Esta sucessão pode ser associada ao modelo de Miall (1996) para os depósitos mais distais de um rio do tipo entrelaçado com leito predominantemente arenoso. E depósitos de planície de inundação seriam pouco expressivos a ausentes, e grandes barras arenosas migrariam formando extensos “lençóis arenosos” (figura 16). Estes corpos arenosos são multiepisódicos, formando complexos amalgamados, com uma alta percentagem de depósitos de barra de meio de canal (Miall, 1996) (elemento DA – figura 15).

Assemelha-se ao encontrado por Bizzi *et al.* (2003) nos depósitos da Formação Penedo estudados no Campo de Pilar. Porém estes autores, reconhecem um retrabalhamento eólico nestes depósitos fluviais, o qual não é visto para a base do intervalo silicilástico no testemunho de sondagem.

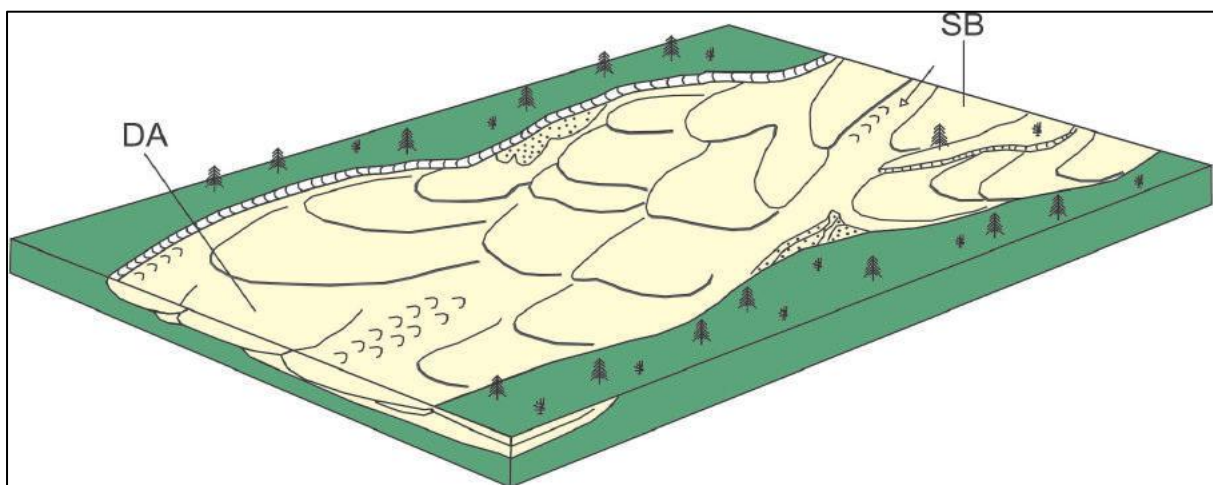


Figura 16. Modelo arquitetural para o sistema fluvial entrelaçado distal (*shallow, perennial, sand-bed braided rivers*) (SB – *Sand bars* e DA – *Downstream accretion*) (Adaptado de Miall, 1995).

SUCESSÃO DE FÁCIES LACUSTRE (SFL)

Em contato abrupto à sucessão de fácies SFF e estratigraficamente acima, observa-se a sucessão SFL, composta por depósitos majoritariamente lamosos, com poucas camadas areníticas e carbonáticas. Esta é caracterizada pela fácies heterolítica (Het) (intercalações de camadas centimétricas de arenitos e lamitos) exibindo estruturas sedimentares trativas; arenitos com laminação cruzada por onda (fácies Alc); uma fina camada com alto conteúdo carbonático (fácies Ca); e expressivos intervalos lamíticos mais ao topo (fácies Lm e LI).

De acordo com Borba et al. (2011), na região de São Miguel dos Campos (AL), os depósitos da Formação Penedo estão sotopostos à Formação Morro do Chaves (figura 4). Logo, a sucessão SFL também pode ser considerada uma sucessão de fácies ainda representante da Formação Penedo.

Sendo interpretada como uma sucessão de fácies representante de um sistema lacustre controlado por descarga de sedimentos terrígenos num corpo d'água via influxo fluvial. Na classificação de Bohacs *et al.* (2000) representaria depósitos de um lago aberto e intermitente (*overfilled e balanced-fill*). No qual, fácies mais próximas ao sistema fluvial formariam os arenitos, através de fluxos hidrodinâmicos trativos com a ação de onda nas regiões rasas do sistema lacustrino, e ainda fácies heterolíticas com alternância de sedimentos mais grossos via fluxo trativo e sedimentos finos decantados. Enquanto nas áreas mais distais, em um ambiente de lago mais profundo, apresentaria uma sedimentação essencialmente lamosa (argila/silte), e uma menor proporção de depósitos arenosos.

As duas sucessões sedimentares encontradas no poço 2-SMC-2-AL, levam a uma interpretação de uma paleogeografia próxima a encontrada no modelo de Hasui

et.al (2012) (figura 17) para a sequência Sin-rifte, na qual depósitos fluviais encontram-se lateralmente aos depósitos lacustres. E segundo Teixeira (2012), em condições de lago alto, favoreceria o predomínio de sedimentação carbonática, onde a bancos de coquinas poderiam ser formados acima dos depósitos lacustres, confirmado pela expressiva camada de coquinas do intervalo superior do testemunho de sondagem (2-SMC-2-AL).

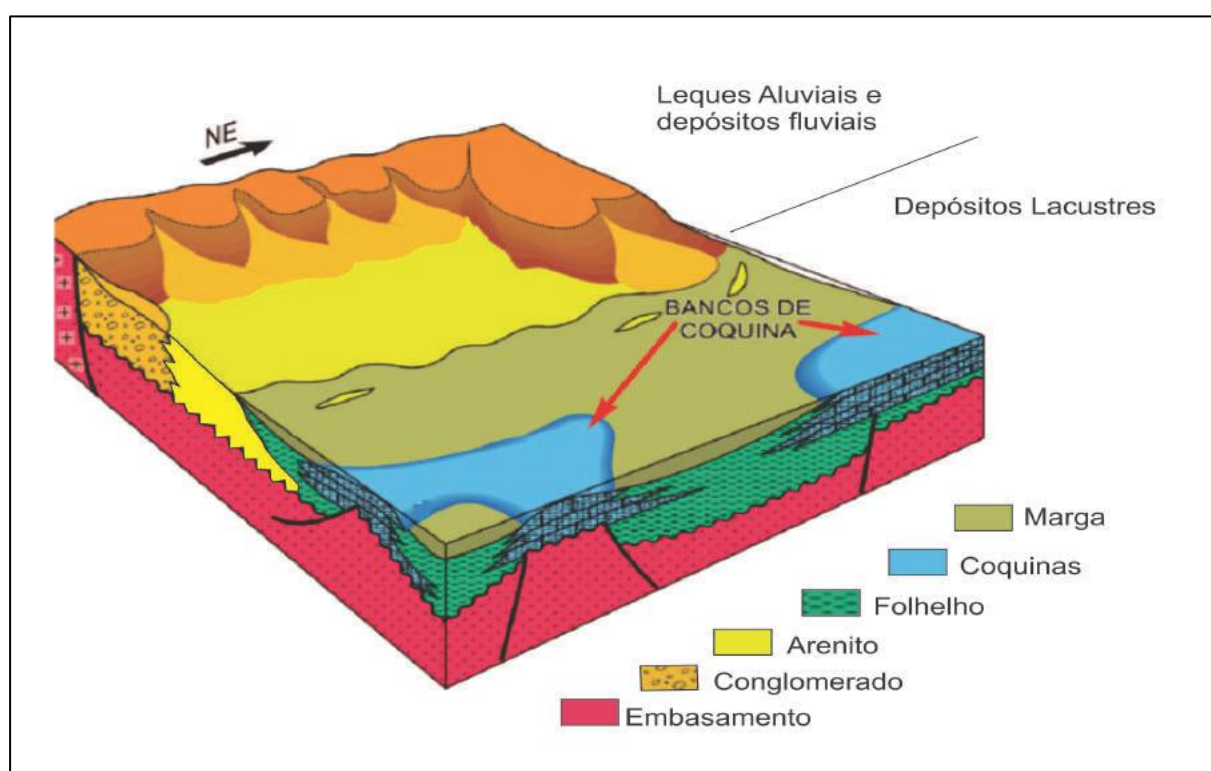


Figura 17. Bloco diagrama mostrando um modelo esquemático da paleogeografia da sequência sin-rifte (Barremiano/Neocomiano) (Modificado de Hasui *et al.*, 2012).

4.6 Análise petrofísica

Foi realizado para as cinco amostragens nos intervalos areníticos, ensaios de permeabilidade absoluta, porosidade efetiva e massa específica de grãos. Com o resultado de características petrofísicas de cada amostra, foi gerado um perfil de permeabilidade (figura 18), um perfil de porosidade (figura 19) e um perfil de correlação

porosidade e permeabilidade (figura 20), para uma análise da variação de suas características de acordo com a profundidade.

Para fins de descrição, os resultados foram separados em dois tipos petrofísicos, sendo denominados aqui, como A e B.

O **tipo petrofísico A** comporta as amostras das profundidades de 196,45 m; 201,40 m e 204,90 m. Os resultados apresentados por estas amostras mostram uma porosidade efetiva variando de aproximadamente 18,3% a 20%, porém com uma permeabilidade muito baixa, com valores inferiores a 1 mD (0,04 mD a 0,7 mD) (Figura 15). Quando comparando as características litológicas de cada amostra e os resultados de permeabilidade absoluta, observa-se que os menores valores de permeabilidade estão nas fácies Alc nas profundidades de 196,45 m e 204,90 m. Esses baixos valores (<0,1 mD) foram relacionados a alta argilosidade apresentada por estas fácies, como abordado na sua descrição faciológica. Porém a amostra da profundidade 204,90m representa um dos intervalos da fácies Ae, onde a porosidade atinge valores de 20% e a permeabilidade aumenta para 0,72 mD. Assim, apresentando um valor de permeabilidade um pouco mais alta que as anteriores, porém não sendo maior que 1 mD esta amostra ainda foi incluída neste conjunto petrofísico.

O **tipo petrofísico B** seria o intervalo com porosidade efetiva com valores relativamente próximos ao tipo A (aproximadamente 22%), porém os valores de permeabilidade absoluta apresentaram-se muito maiores, visto aos intervalos mais rasos. Na profundidade de 205,90 metros, o valor de permeabilidade foi de 54,81 mD, com um arenito médio mal selecionado estratificado. Já na profundidade 206, 90 metros, a permeabilidade absoluta atingiu valores de aproximadamente de 754 mD, em um arenito muito grosso maciço e moderadamente selecionado. E a partir do perfil de porosidade puderam ser reconhecidas as fácies representantes da sucessão SFF (fácies

Ae e Am) onde os seus valores de porosidade foram próximos e um pouco destoante dos demais (figura 18).

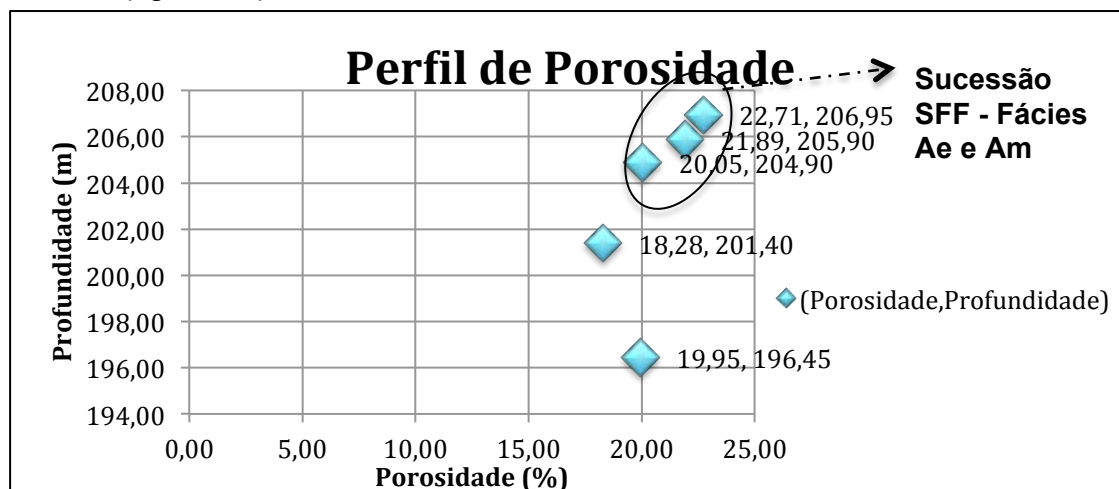


Figura 18. Perfil de Permeabilidade para as amostras do intervalo siliclástico.

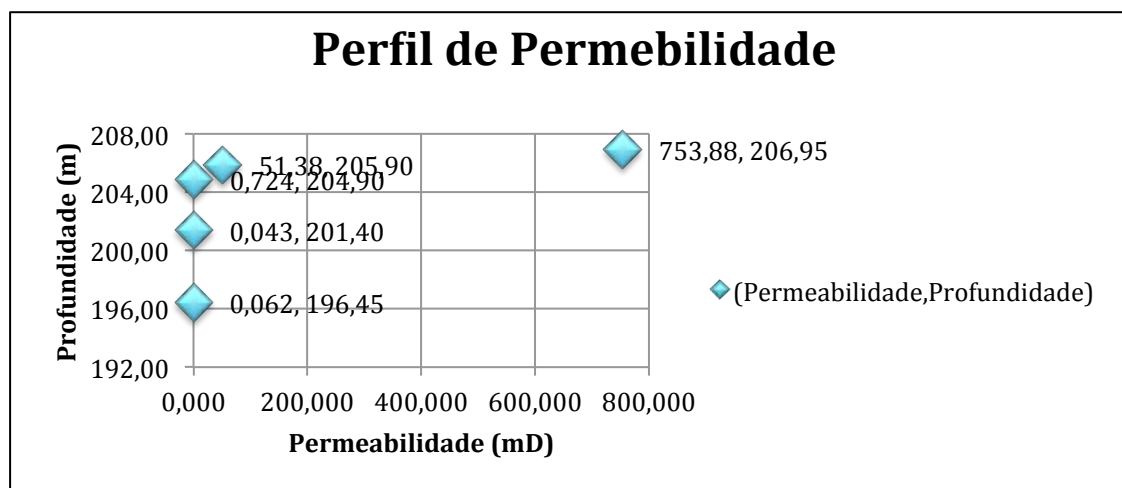


Figura 19. Perfil de Porosidade para as amostras do intervalo siliclástico.

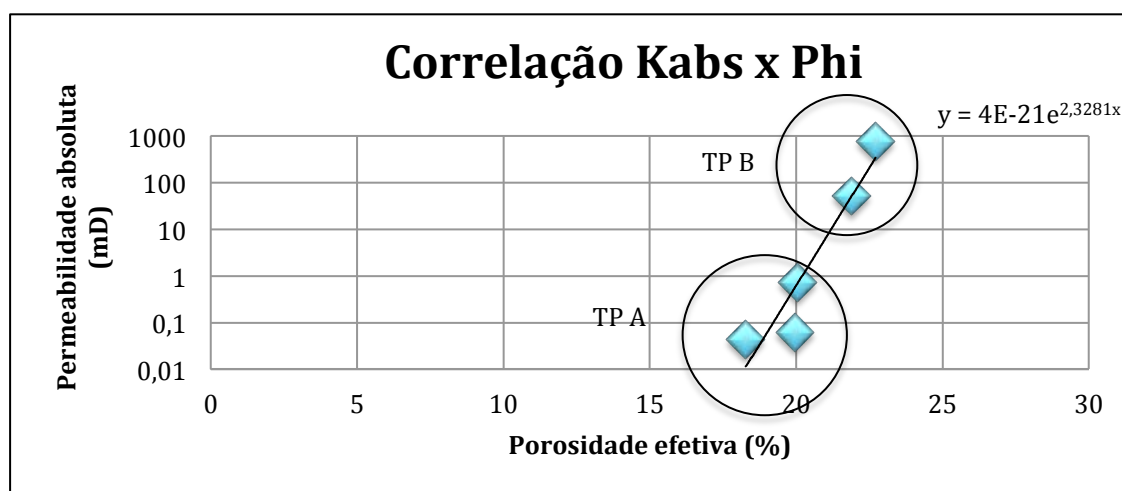


Figura 20. Perfil de Correlação permeabilidade absoluta e porosidade efetiva (KabsxPhi), com os tipos petrográficos A e B (TP A e TP B).

5. DISCUSSÕES

5.1 Paleoambiente

De acordo com Bizzi *et al.*, 2003 e Ferreira (1990) *apud* Feijó (1994), a Formação Penedo estudada no Campo de Pilar próxima a cidade de Maceió, representa uma sucessão sedimentar associada a um sistema fluvial entrelaçado, com retrabalhamento eólico.

A partir da caracterização das sete fácies encontradas no intervalo siliciclástico do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL, são reconhecidas fácies de rio entrelaçado, denominadas aqui como sucessão de fácies fluvial (SFF), com espessas camadas de arenitos estratificados (fácies Ae) e arenitos maciços (fácies Am), ambas encontradas na base do intervalo siliciclástico. No entanto, fácies eólicas não são identificadas neste testemunho, assim como não foram reconhecidas por Borba *et al.* (2009) no Campo de Furado, em áreas próximas ao Município de São Miguel dos Campos. Porém, Pinho e Costa (1990), descrevem fácies eólicas da Formação Barra de Itiúba em regiões próximas à cidade de Maceió.

A ausência de fácies com retrabalhamento eólico no intervalo de estudo do testemunho, sugere que as fácies eólicas podem ser restritas na região de estudo, não estando diretamente associada a mudanças paleoclimáticas globais (períodos de desertificação).

Campos Neto *et al.* (2007) correlacionam a Formação Penedo à um final de um pulso tectônico, em que os depósitos fluviais preencheriam alguns depocentros da bacia. Logo, a sucessão SFF, seria representante deste estágio final de uma atividade tectônica, com maiores influências fluviais. Podendo ainda ser delimitado um possível limite de tectonosequência entre a sucessão SFF.1 e SFF.2 (Figura 8), onde ocorre uma

mudança das características texturais nas camadas areníticas associada à criação de espaço na bacia relacionado a atividade tectônica.

Entretanto, o topo do intervalo siliclástico neste testemunho, é caracterizado por uma sucessão sedimentar lacustre com fácies lamosas (SFL), compostas pelas fácies lutíticas (Sl e Lm), fácies heterolítica (Het), fácies arenítica (Alc) e uma pequena fácies carbonática (Ca). Esta sucessão revela uma mudança do predomínio da sedimentação, deixando de ser essencialmente fluvial, passando para depósitos lacustres (figura 21). Esta alteração na sedimentação, sugere uma influência tectônica e/ou climática, resultando em diferente aporte de terrígenos (Miall, 2006). E o abrupto contato entre as duas sucessões sedimentares supracitadas poderia ser correlacionado a uma possível influência tectônica na bacia.

E ainda, Talbot & Allen (1986) caracterizam corpos aquosos sem expressivas ligações com o oceano, como sistemas deposicionais relativamente sensíveis a mudanças climáticas. Como grandes lagos, apresentando assoalho com baixo gradiente topográfico e considerável variação do nível d'água, podendo apresentar migração da linha de costa. Estas oscilações da linha costa seria mais pronunciada em regiões onde a variação das condições climáticas fossem mais severas, determinando períodos em que há maior ou menor entrada de água no sistema devido a descargas fluviais.

O trabalho de Talbot & Allen (1986) corrobora no entendimento da dinâmica da sucessão SFL, sendo a base da sucessão SFL composta por uma intercalação de arenitos e lamitos (fácies heterolítica), sugerindo uma interpretação de um ambiente de transição entre os dois sistemas (fluvial/lacustre) e a variação climática controlaria a oscilação de influxos fluviais adentrando no sistema lacustre. A presença da fina camada da fácies Alc acima da fácies Het, retrata depósitos nas porções marginais do lago

(*nearshore*), como sugerido por Martel & Gibling (1991) no estudo da Formação Horton Bluff, no Canadá.

Em direção ao topo do perfil, e acima a fácies Alc encontra-se a fina camada carbonática (fácies Ca) reconhecida aqui como retrabalhamento de bancos carbonáticos (coquinas) por fluxos trativos com influxo de material siliciclástico. Enquanto o nível relativo do lago aumentaria, e de acordo com Borba *et al.* (2009) gerando maior espaço de acomodação na bacia, onde depósitos lutíticoss (fácies Sl e Lm) poderiam se estabelecer. O segundo aparecimento da fácies Alc, na parte superior do perfil estratigráfico, poderia ser discutido como uma nova variação climática no ambiente, sendo possível a instalação de arenitos de margens de lago novamente.

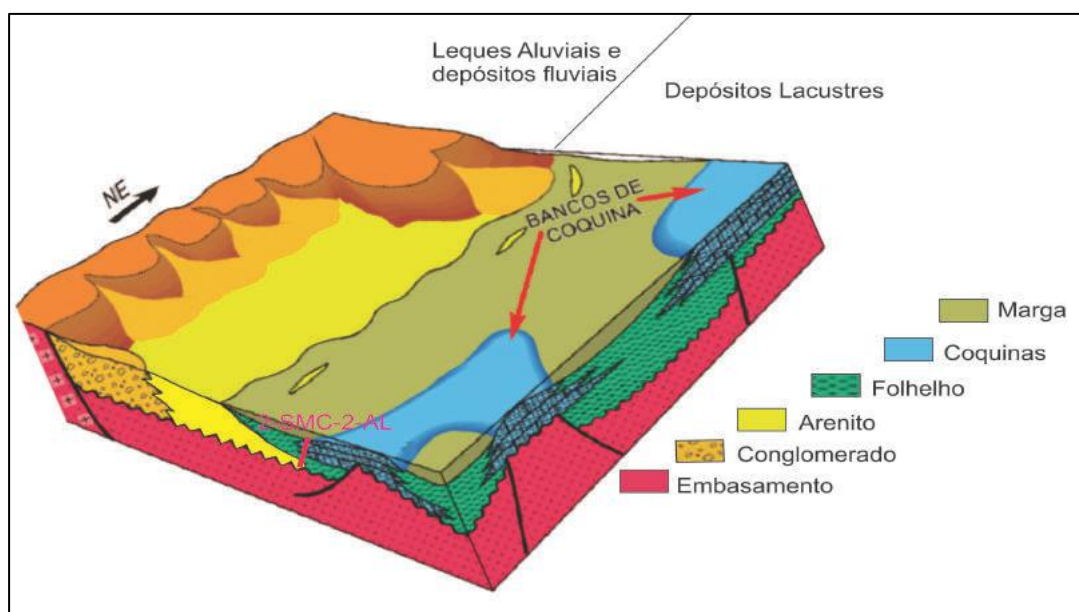


Figura 21. Bloco diagrama mostrando um modelo esquemático da paleogeografia da sequência sin-rifte (Barremiano/Neocomiano) com possível localização do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL (Adaptado de Hasui *et al.*, 2012).

5.2 Porosidade e permeabilidade

Os valores de porosidade e permeabilidade obtidos a partir do ensaio de petrofísica em plugues das fácies areníticas, revela coerência com suas propriedades texturais vistas nas descrições da fácies, e ainda na análise petrográfica.

O tipo petrofísico A composto por duas amostras da fácies Alc e uma da fácies Ae apresenta baixos valores de permeabilidade absoluta (0,04 mD a 0,7 mD) e porosidade efetiva variando de 18% a 20%. Definido como o tipo petrofísico com baixas características de reservatório, dadas pelos baixíssimos valores de permeabilidade, os quais não atingiram uma unidade de mD. Assim como no trabalho de Silva e Borghi (2013) fácies com permeabilidades inferiores a 1 mD, foram classificadas aqui como rochas com baixa qualidade para reservatório, mesmo apresentando valores de porosidades relativamente altos. Seu baixo potencial como reservatório ainda é expresso em suas descrições petrográficas, de acordo com Rodrigues & Goldberg (2014) a imaturidade textural de seus depósitos, com alta porcentagem de micas (biotita) e presença de argilominerais revelam uma baixa qualidade para armazenamento de hidrocarbonetos para estas rochas.

Já o tipo petrofísico B, com valores maiores de permeabilidade absoluta (54 mD e 753 mD) é caracterizado por um intervalo da fácies Ae e um da fácies Am, sua diferença de permeabilidade pode ser reconhecida pela mudança de seleção nestas fácies, e a menor presença de matriz argilosa na fácies Am. Logo, a estrutura sedimentar da fácies não é um fator determinante para uma melhora permeabilidade da rocha, já que muitas das vezes, a estratificação cruzada é dada pela orientação de micas (biotita), não favorecendo uma boa permeabilidade à rocha. Devido a suas características sedimentológicas, a fácies Ae mostrou uma qualidade moderada quando sua

permeabilidade absoluta atinge valores maiores que 50 mD, enquanto a fácies Am possui as melhores características de reservatório dentre as amostras descritas.

Porém, a fácies Am apresenta baixa representatividade no perfil do intervalo silicilático, visto percentual menor que 30% na sucessão de fácies SFF. Sendo esta fácies com alta qualidade de reservatório, pouco expressiva no testemunho, caracterizando um baixo potencial para reservatório para as rochas estudadas. No entanto, estas fácies ainda apresentaram altos valores de porosidade, superiores aos encontrados por Bizzi *et al.* (2003) para as fácies eólicas (porosidade de 15%) no Campo de Pilar.

Para fins de correlação dos dados obtidos a partir dos ensaios petrofísicos, foram ainda utilizados perfis geofísicos do testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL de um relatório interno do Projeto SACL. Onde os tipos petrofísicos A e B também puderam ser reconhecidos através de uma análise do perfil geofísico de potencial espontâneo (SP), juntamente aos valores dos dados petrofísicos (figura 22).

A partir de uma análise do comportamento dos perfis geofísicos de SP, foi reconhecido para as amostras mais rasas, tipo petrográfico A, valores correspondentes aos sedimentos lamosos, nos quais a permeabilidade absoluta (marcadores azuis) esperada é próxima a zero. Já os arenitos mais profundos (tipo B) mostraram valores maiores, como é correlato ao *trend* encontrado na linha de potencial espontâneo (SP).

As porosidades efetivas das amostras (marcador vermelho) quantificada através do ensaio petrofísico, são correspondentes aos valores encontrados para a porosidade total extraída do perfil Sônico. Reconhecendo-se assim a não confiabilidade dos valores de porosidade extraído do perfil geofísico. Sendo necessário ensaios de petrofísica para quantificar os reais valores de porosidades dos intervalos.

No entanto, a partir do *trend* do perfil de potencial espontâneo é possível reconhecer intervalos com diferentes permeabilidades, sendo realizado uma análise qualitativa de permeabilidade no poço. Deste modo, para o intervalo silicilástico estudado neste trabalho é um padrão com valores mais altos de permeabilidade nas camadas mais profundas, enquanto as camadas mais do topo apresentam baixíssimas permeabilidades.

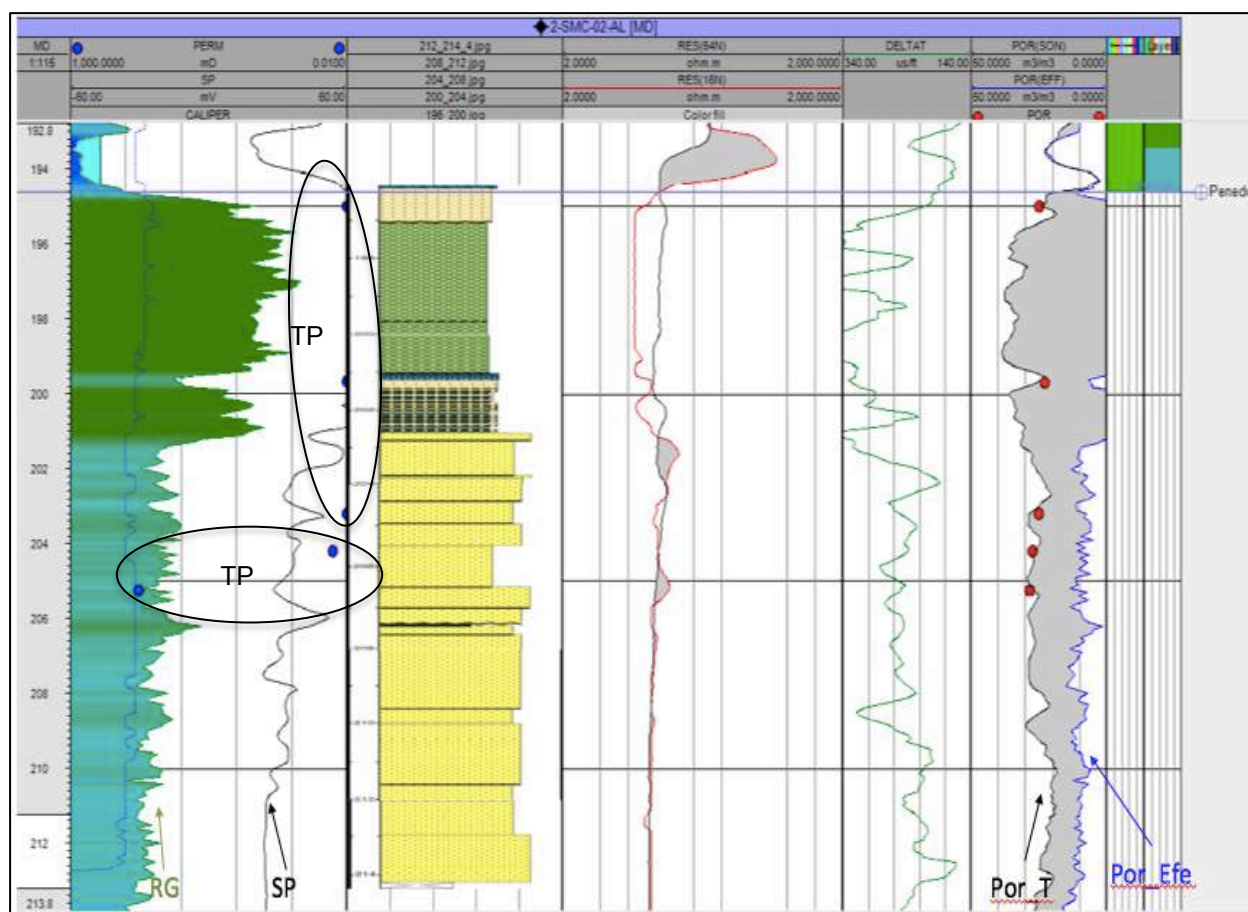


Figura 22. Imagem dos perfis geofísicos para as amostras do intervalo silicilástico do testemunho 2-SMC-2-AL exportado do *software* Petrel, contendo dados dos ensaios de petrofísica: (Permeabilidade absoluta - marcadores azuis; e porosidade – marcadores vermelhos). RG – Perfil de raio gama; SP – Perfil de Potencial Espontâneo; Por. T – Porosidade Total; e Por. Efe – Porosidade Efetiva extraídos do Perfil Sônio.

6. CONCLUSÃO

A Formação Penedo no testemunho de sondagem 2-SMC-2-AL é caracterizada por sete fácies sedimentares, sendo predominantemente terrígenas. Definidas por seus aspectos texturais e suas estruturas sedimentares, foram separadas em três fácies arenítica (Alc, Ae e Am), uma heterolítica (Het), uma carbonática (Ca) e duas lutíticas (Sl e Lm). A interpretação das fácies levou a uma divisão em duas sucessões sedimentares (SFF e SFL), definidas por sua predominância de sedimentação. Na qual, SFF seria composta por depósitos fluviais entrelaçado, e SFL, por uma sedimentação lacustre. Estratigraficamente configura uma sedimentação com predominância de clastos mais finos para o topo, com forte influência tectônica evidenciada pela abrupta mudança do aporte sedimentar. A ausência de fácies eólica neste testemunho de sondagem, pode sugerir um fator paleoclimático, o qual não favoreceria o retrabalhamento eólico dos depósitos fluviais próximos a região de São Miguel dos Campos.

Características de reservatório foram obtidas a partir da análise dos resultados dos ensaios de porosidade efetiva e permeabilidade absoluta nas fácies areníticas, permitindo ainda classificá-las segundo suas qualidades de reservatório. Onde a fácies Alc apresentou baixo potencial, e a fácies Ae pode apresentar qualidade moderada, quando é atingido valores de permeabilidade maiores que 50 mD. Já a fácies Am com um melhor potencial para reservatório, apresenta valores mais satisfatórios frente aos encontrados por Bizzi *et al.* (2003) no Campo de Pilar. Porém, no intervalo em estudo a fácies Am possui representatividade limitada, sendo apenas 28% das rochas constituintes da sucessão SFF.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C., VIDOTTI, R. M., & GONÇALVES, J. H. 2003. **Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil**. CPRM, Brasília, cap. X, 553- 556.
- BORGHI, L. 2000. **Visão Geral da Análise de Fácies Sedimentares do Ponto de Vista da Arquitetura Depositional**. Boletim Museu Nacional, Rio de Janeiro, 26-53.
- BORGHI, L., TAVARES, A.C.G., CORBETT P.W.M., MENDES M.S., ABBOTS F. 2015. **Towards developing a new classification scheme for coquinas and shell concentrations**. 15th Bathurst Meeting, University of Edinburgh, United Kingdom.
- BORBA, C. 2009. **Estratigrafia de alta resolução aplicada à modelagem de reservatórios do início do rifte da Bacia de Sergipe-Alagoas**. Rio de Janeiro: Boletim de Geociências Petrobras, v.17, n.2, 291–309.
- BORBA, C., PAIM, P. S. G., & GARCIA, A. J. V. 2011. **Estratigrafia dos depósitos iniciais do rifte no Campo de Furado, região de São Miguel dos Campos, Bacia de Sergipe-Alagoas**. *Brazilian Journal of Geology*, 41(1), 18-36.
- CÂMARA, R.N. 2013. **Caracterização petrofísica de coquinas da Formação Morro do Chaves (Barremiano/Aptiano), intervalo Pré-Sal da Bacia de Sergipe - Alagoas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 112p.
- CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA, W.S.; CRUZ, F.E.G. 2007. **Bacia de Sergipe-Alagoas**. Rio de Janeiro: Boletim de Geociências Petrobras, v.15, n.2, 405–415.
- CRUZ, L. R. 2008. **Caracterização tectono-estratigráfica da sequência transicional na sub-bacia de Sergipe**. Tese de doutorado, Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 5p.
- DE ROS L.F., GOLDBERG K., ABEL M., VICTORETI F., MASTELLA M. & CASTRO E. 2007. **Advanced acquisition and management of petrographic information from reservoir rocks using the Petroledge® System**. AAPG ANNUAL CONVENTION AND EXHIBITION, Long Beach, *Expanded Abstracts*.
- FEIJÓ, F. J. 1994. **Bacias de Sergipe e Alagoas**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, 149-16, jan./mar.
- FISHER, W & MCGOWEN, J. H. 1967. **Depositional systems in Wilcox Group of Texas and their relationships to occurrence of oil and gas**. *Gulf Coast Assoc. Of Geol. Soc., Trans.*, 17:213-248.
- FOLK R.L. 1968. **Petrology of sedimentary rocks**. Austin, Hemphill's, 182p.

HAMSI JÚNIOR, G. P.; KARNER, G. D.; BARROS, F. A. R. 2006. **A crosta transicional da Bacia Sergipe-Alagoas**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, Aracaju. Anais. Bahia: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 17.

HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F.F.M., BARTORELLI, A. **Geologia do Brasil**. Editora Beca, 2012. 900p.

LANA, M. C. 1985. **Rifteamento da Bacia Sergipe-Alagoas, Brasil**. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 124 p.

LANA, M. C. 1990. **Bacia de Sergipe-Alagoas: Uma Hipótese de Evolução Tectono-Sedimentar**. In: GABAGLIA, G. P. R.; MILANI, E. J. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares. Rio de Janeiro: Editora Gávea, p.415

MARTEL, A. T., & GIBLING, M. R. 1991. **Wave-dominated lacustrine facies and tectonically controlled cyclicity in the Lower Carboniferous Horton Bluff Formation, Nova Scotia, Canada. *Lacustrine Facies Analysis: International Association of Sedimentologists Special Publication*, 13, 223-243.**

MIALL, A. D. 1985. **Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits**. *Earth Sci. Rev.*, 22 (4), 261-300.

MIALL, A. D. 1996. **The Geology of Fluvial Deposits**. Sedimentary Facies, Basin Analysis, and Petroleum Geology. Springer. Berlin, p.583

NELSON, P. H. 1994. **Permeability-porosity relationships in sedimentary rocks**. *The log analyst*, 35(03).

PONTE, F. C.; ASMUS, H. E. 1976. **The Brazilian margin basins-current state of knowledge**. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v. 48, supl., 215-240

PINHO, G. C.; COSTA, M. N. C. **Fácies eólica na Formação Barra de Itiúba, exemplo de potencial reservatório profundo**. Boletim de Geociências da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, p. 489-508, dez. 1990.

RAMOS, R.R.C.; MELLO, C.L.; SANSON, M.S.R. 2006. **Revisão estratigráfica da Bacia de Resende, Rift Continental do Sudeste do Brasil, estado do Rio de Janeiro**. Geociências, 25, 59-69.

ROCK-COLOR CHART COMMITTEE. 1991. **Rock Color Chart: With Genuine Munsell Color Chips**. Geological society of America.

RODRIGUES, A. G., & GOLDBERG, K. 2014. **Primary composition and diagenetic patterns of sandstones from Barra de Itiúba Formation in Atalaia High, Sergipe Sub-Basin**. *Brazilian Journal of Geology*, 44(4), 545-560.

SCHALLER, H. 1969. **Revisão estratigráfica da Bacia de Sergipe / Alagoas**. Boletim Técnico da Petrobras, Rio de Janeiro, v. 12, n. 1, 21-86.

SELLEY, R. C. 1985. **Ancient Sedimentary Environments** (3ed.). Chapman and Hall Ltd., London. 273 p.

SILVA, P. L., & ALMEIDA, L. F. B. D. 2013. **Caracterização Faciológica dos Reservatórios e Depósitos Associados do Campo de Frade, Bacia de Campos, Rio de Janeiro**. *Anuário do Instituto de Geociências*, 36(2), 45-60.

SMITH, M. E., & CARROLL, A. R. 2015. **Stratigraphy and Paleolimnology of the Green River Formation, Western USA** v.1. Springer. 160-165.

SOUZA-LIMA, W.; ANDRADE, E. J.; BENGTSON, P.; GALM, P. C. 2002. **A Bacia de Sergipe- Alagoas: Evolução Geológica, Estratigrafia e Conteúdo Fóssil**. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix, Edição especial, 1, 34p.

TALBOT, M. R., & ALLEN, P. A. 1996. **Lakes. Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy**, 3, 83-124.

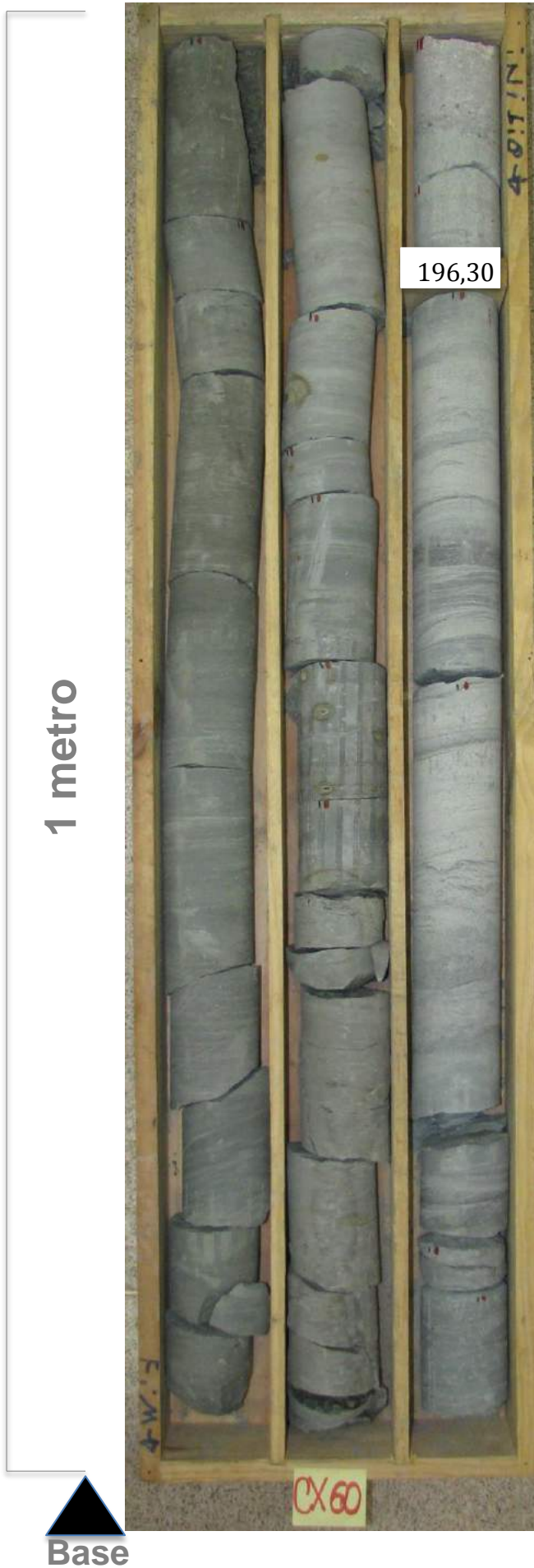
TAVARES, A. C., BORCHI, L., CORBETT, P., NOBRE-LOPES, J., & CÂMARA, R. 2015. **Facies and depositional environments for the coquinas of the Morro do Chaves Formation, Sergipe-Alagoas Basin, defined by taphonomic and compositional criteria**. *Brazilian Journal of Geology*, 45(3), 415-429.

TEIXEIRA B. F.L. 2012. **Coquinas da Formação Morro do Chaves (Cretáceo Inferior), seção Rife da Bacia Sergipe-Alagoas**. Trabalho de conclusão de curso, Graduação em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 100 p.

ZUFFA G.G. 1985. **Optical analyses of arenites: influence of methodology on compositional results**. In: Zuffa, G.G. (Ed.). *Provenance of Arenites*. Dordrecht, NATO-ASI Series C. D. Reidel Pub. Co., 148, 165-18.

TUCKER, M.E. 1988. **Techniques in Sedimentology**: Oxford, Blackwell Sci. Publ, 391p.

Apêndice A – Fotografia dos testemunhos de sondagem do intervalo siliciclástico do poço 2-SMC-2-AL (196,20m a 214,40m).



Topo

CAIXA 60

1 metro

196,30

CX60

Base

CAIXA 61





202,10

62

CAIXA 62

CAIXA 63



CAIXA 64



CAIXA 65



Apêndice B – Planilha com dados da Análise Petrofísica das amostras do intervalo siliciclástico do poço 2-SMC-2-AL.

PETROFÍSICA BÁSICA (POROSIDADE & PERMEABILIDADE)
PLUGUES
2-SMC-2-AL

Estufa seca

Profundidade (m)	Número da Amostra	Pressão de confinamento (psi)	Permeabilidade (mD)		Porosidade (%)	Densidad e dos grãos (g/cm³)	Volume de poro (cm³)	Sem Correção		Peso (g)
			ao Ar	Klinkenberg				Altura (cm)	Diâmetro (cm)	
196,45	1	500	0,098	0,062	19,95	2,75	3,16	3,27	2,50	34,90
201,40	2	500	0,072	0,043	18,28	2,77	3,32	3,76	2,50	41,11
204,90	3	500	0,929	0,724	20,05	2,70	5,21	5,35	2,51	56,12
205,90	4	500	54,81	51,38	21,89	2,66	6,26	5,96	2,50	59,45
206,95	5	500	784,65	753,88	22,71	2,65	5,93	5,38	2,51	53,38
Valores médios:			168,11	161,22	20,60	2,71	4,78	4,74	2,50	48,99